

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Secção Autónoma de História e Filosofia das Ciências



**Reapreciação da génese  
do electromagnetismo clássico**

**Sofia Pedro Lima**

Dissertação  
Mestrado em História e Filosofia das Ciências

**2014**

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Secção Autónoma de História e Filosofia das Ciências



**Reapreciação da génese  
do electromagnetismo clássico**

**Sofia Pedro Lima**

Dissertação

Mestrado em História e Filosofia das Ciências

Orientador: Rui Nobre Moreira

**2014**

## Índice

Introdução .....	6
I. A metafísica de Newton .....	8
1.1 O conceito newtoniano de espaço absoluto .....	8
1.2 O conceito newtoniano de tempo absoluto .....	10
1.3 Discussão em torno da existência do espaço absoluto e do movimento absoluto e da necessidade destes conceitos para a física de Newton .....	11
1.4 Pontos materiais, sem extensão espacial, existentes num ponto do espaço em cada instante de tempo sem duração temporal.....	14
1.5 Forças aplicadas e forças centrais: abordagem matemática da acção à distância.....	14
II. A situação da electricidade e do magnetismo antes do advento do electromagnetismo.....	17
III. A situação na óptica antes de se considerar parte do electromagnetismo .....	22
3.1 Concepção Newtoniana da luz.....	22
3.2 A teoria ondulatória de Young e Fresnel .....	22
3.2.1 A difracção.....	23
3.2.2 A polarização.....	24
3.2.3 As propriedades do éter e as dificuldades levantadas pelas características da propagação da luz.....	25
3.2.4 A teoria ondulatória da luz e a metafísica Newtoniana .....	26
IV. As descobertas de Oersted e Ampère: o início do electromagnetismo ....	27
V. A interpretação de Faraday dos fenómenos electromagnéticos. ....	30
5.1 O início da investigação de Faraday .....	30
5.2 Indução electromagnética .....	33

5.2.1 Descoberta da indução electromagnética e conjecturas propostas .....	33
5.2.2 Aplicação da conjectura final sobre a indução electromagnética.....	36
5.3 Interpretação de Faraday versus interpretação dos newtonianos das linhas de força. ....	37
5.4 Investigação dos fenómenos electroquímicos.....	39
5.5 Electroestática como acção por contiguidade .....	42
5.5.1 Início da investigação em electroestática .....	42
5.5.2 Três questões sobre os fenómenos electroestáticos .....	43
5.5.3 A concepção de Faraday sobre a indução electroestática .....	45
5.5.4 Descargas e correntes eléctricas .....	47
5.5.5 Notas finais acerca da indução electroestática: o quarto artigo sobre electroestática.....	49
5.6 Relação entre a força eléctrica e a força magnética.....	51
5.6.1 A concepção de Faraday do electromagnetismo.....	51
5.6.2 Análise crítica da concepção de Faraday do electromagnetismo .....	54
5.7 O electromagnetismo de Faraday e a sua concepção de matéria.....	54
5.8 O diamagnetismo e o paramagnetismo em Faraday.....	58
5.8.1 Descoberta da rotação magnética do plano de polarização da luz .....	58
5.8.2 Descoberta do diamagnetismo e paramagnetismo.....	61
5.8.3 Conjecturas propostas.....	62
5.9 Conclusão das <i>Experimental Researches</i> .....	64
5.10 A opinião de Faraday acerca das linhas de força .....	66
5.11 O artigo “On the Physical Character of the lines of Magnetic force” .....	68
5.12 Resumo das concepções de Faraday sobre o electromagnetismo .....	72
VI. Reacção à investigação e descobertas de Faraday .....	74
6.1 Os trabalhos de Neumann e Weber .....	74

6.2 O “acolhimento” das ideias de Faraday em Cambridge .....	76
VII. As teorias electromagnéticas de Maxwell e Lorentz .....	80
7.1 O artigo “On Faraday Lines of force” .....	80
7.2 O campo electromagnético como resultado de um modelo mecânico do éter: o artigo “On physical lines of force” .....	87
7.2.1 O modelo do éter .....	88
7.2.2 Equações de Maxwell .....	91
7.2.3 Ondas electromagnéticas .....	111
7.3 Nova dedução das equações e das ondas electromagnéticas transversais: o artigo “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field” .....	113
7.4 A teoria de Maxwell para além das equações .....	117
7.4.1 O que é (para Maxwell) o campo electromagnético? .....	117
7.4.2 Carga eléctrica, correntes e ímanes: as fontes do campo electromagnético .....	118
7.4.3 Polarização eléctrica e magnética do vácuo .....	120
7.4.4 Corrente de deslocamento e sua relação com as ondas electromagnéticas .....	121
7.5 Resumo da teoria electromagnética de Maxwell .....	122
7.6 Problemas da teoria electromagnética de Maxwell devidos à separação entre espaço, campo e matéria .....	123
7.6.1 Problemas relacionados com a separação entre matéria e campo .....	124
7.6.2 Problemas relacionados com a existência de um espaço absoluto .....	127
7.7 Recepção da teoria de Maxwell .....	128
7.8 A teoria electromagnética não relativista de Lorentz .....	129
7.8.1 Éter, espaço e matéria na teoria electromagnética de Lorentz ..	129
7.8.2 Cargas, correntes, condutores e dieléctricos .....	130

7.8.3 As equações de Lorentz para o campo eléctrico e magnético.....	131
7.8.4 A força de Lorentz .....	133
7.8.5 As equações de Lorentz para um sistema de referência num laboratório na terra.....	135
7.8.6 O princípio da relatividade e as tentativas de confirmação da existência de um referencial privilegiado no qual a velocidade da luz fosse $c$ . .....	137
Conclusão .....	139
Bibliografia .....	143

## Introdução

O electromagnetismo clássico é constituído por um conjunto de conjecturas e teorias, desenvolvidas no séc. XIX, que procuraram explicar os fenómenos electromagnéticos, em particular, as interacções entre a electricidade e o magnetismo.

Estas conjecturas e teorias têm diferentes fundamentos, isto é, assentam em diferentes conceitos e ideias prévias acerca das entidades físicas que compõem o universo, ou, dito de outra forma, em diferentes metafísicas ou visões do mundo.

O objectivo desta dissertação é a análise destes fundamentos e das conjecturas e teorias propostas a fim de tentar detectar problemas que à luz dos conhecimentos actuais poderiam ser hoje resolvidos de outra maneira.

Para isso, começaremos por analisar a concepção newtoniana do mundo, ou, dito de outra forma, a metafísica newtoniana, pois esta era a visão do mundo prevalecente no início do séc. XIX.

Analisaremos, de seguida, as concepções newtonianas da electricidade e do magnetismo e as conjecturas propostas neste quadro para explicar os fenómenos eléctricos e magnéticos conhecidos antes da descoberta das interacções entre estes dois ramos da física.

Analisaremos também a situação da óptica antes de a luz ser considerada um fenómeno electromagnético e veremos aí o surgimento de uma metafísica diferente da metafísica newtoniana.

Passaremos então à análise das conjecturas e teorias electromagnéticas propriamente ditas. Veremos como cada uma delas se desviou mais ou menos da metafísica newtoniana, começando pela conjectura de Ampère acerca do magnetismo e da sua relação com as correntes eléctricas.

Depois analisaremos com detalhe a interpretação de Michael Faraday dos fenómenos electromagnéticos, por ser a primeira tentativa de construir uma teoria do campo electromagnético, analisando, nomeadamente, os argumentos que Faraday usou para defender uma visão do mundo completamente diferente da newtoniana.

Veremos de seguida como a visão do mundo de Faraday foi praticamente ignorada e referiremos as conjecturas alternativas que surgiram, nomeadamente a de Wilhelm Weber. Veremos também como William Thomson fez a ponte entre Faraday e

James Clerk Maxwell, transmitindo a este uma interpretação pessoal do trabalho e das ideias de Faraday.

Finalmente, analisaremos as duas mais conhecidas teorias electromagnéticas clássicas: a de James Clerk Maxwell e a de Hendrik Lorentz.



## I. A metafísica de Newton

Isaac Newton foi o fundador da mecânica clássica. A sua obra *Mathematical Principles of Natural Philosophy* fundou e influenciou toda a chamada física clássica.

Na referida obra, além das suas famosas leis do movimento e da gravitação, Newton defendeu uma visão do mundo discutindo conceitos tão fundamentais como o conceito de espaço e de tempo. Está também subjacente um conceito de matéria e é desenvolvido um conceito de força.

É com estes conceitos que Newton constrói a sua mecânica.

### 1.1 O conceito newtoniano de espaço absoluto

Na discussão que faz do conceito de espaço, na sua obra *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, Newton distinguiu dois tipos de espaço, o espaço relativo e o espaço absoluto.

O espaço relativo – diz-nos – é aquele que “é determinado pelos nossos sentidos em relação aos corpos” [Newton, *Principia*, pág.408]. Este é o espaço sobre o qual medimos posições relativas e que nos permite estudar o movimento (ou repouso) relativo dos corpos, analisando a variação (ou constância) no tempo das suas posições relativas.

O espaço relativo é, como o próprio nome indica, sempre relativo a um corpo, não podendo ser definido na ausência de corpos. Além disso, um corpo que se mova num espaço relativo pode estar parado noutro e vice-versa. Isto significa que o movimento num espaço relativo é, ele próprio, relativo, o mesmo se passando no repouso. No que respeita aos espaços relativos não é possível dizer se este ou aquele objecto está parado ou em movimento, mas apenas que está parado ou em movimento em relação a um dado objecto. Não é possível classificar o movimento de um objecto, senão em relação a outro.

Newton refere-se a esta questão notando que os espaços relativos podem mover-se uns em relação aos outros. Por exemplo, o espaço no qual um barqueiro se move, o seu barco, pode estar a mover-se sobre a terra, que por sua vez se move em

relação ao sol e assim sucessivamente. O movimento do espaço relativo tem de ser acrescentado ao movimento do corpo quando se analisa este movimento a partir de outro espaço relativo.

Por oposição ao conceito de espaço relativo, que se move em relação a outros e que só é concebido em relação a objectos sensíveis, Newton define o espaço absoluto como o espaço que existe “por sua natureza, sem relação com algo exterior, [e que] se mantém sempre semelhante e imóvel” [Newton, *Principia*, pág.408].

Este é o verdadeiro espaço, no entender de Newton. Todos os outros, os espaços relativos, não são senão resultado da necessidade de distinguir, umas das outras, as partes do espaço absoluto, indicando a sua relação com corpos sensíveis, pois são, por si mesmas, indistinguíveis pelos sentidos.

É também um espaço matemático, idêntico ao espaço euclidiano da geometria.

Depois de definir espaço absoluto, existente por si mesmo, independentemente dos objectos físicos que servem de referência aos espaços relativos, Newton pode agora definir, e define, o movimento e o repouso absoluto. O repouso absoluto passa a estar definido pela permanência num mesmo ponto ou porção do espaço absoluto, ou seja, numa mesma posição absoluta. O movimento absoluto passa a estar definido como uma mudança na posição absoluta.

A partir daqui cada corpo passa a ter o seu próprio movimento, definido independentemente de qualquer outro corpo. Passa então a poder dizer-se que um corpo está parado, absolutamente parado e não apenas parado em relação a este ou aquele corpo, ou em movimento, absolutamente em movimento e não apenas com um movimento relativo que se torna outro quando observado de um espaço relativo diferente.

Newton define também quantidade de movimento (absoluto) como o produto da massa do corpo pela sua velocidade (absoluta) e considera que um corpo mantém ou altera o estado de movimento consoante esta quantidade de movimento se mantém ou não constante.

As noções de espaço absoluto e de quantidade (absoluta) de movimento, ou estado de movimento, estão na base das leis de Newton.

## 1.2 O conceito newtoniano de tempo absoluto

Para além do espaço absoluto, o movimento absoluto a que se referem as leis da mecânica de Newton pressupõe a existência de um tempo absoluto.

Com efeito, o movimento envolve não só uma noção de posição e, portanto, de espaço, mas também a variação no tempo dessa posição, o que implica uma noção de tempo. Sendo o movimento absoluto, ou seja, definido sem relação a qualquer corpo sensível, este pressupõe não só uma posição absoluta num espaço absoluto, mas também um tempo absoluto, definido, tal como o espaço absoluto, sem relação com algo exterior.

Este tempo absoluto, Newton define como sendo aquele que “por sua natureza, sem referência a qualquer coisa externa, flui uniformemente” [Newton, *Principia*, pág.408] e distingue-o do tempo relativo que se obtém “por qualquer medição sensível e externa da duração [temporal] por meio do movimento” [Ibidem].

Por outras palavras, Newton distingue o tempo relativo, dado pelos relógios que o medem com recurso a um movimento considerado periódico, e cujo período se considera como unidade de medida, do tempo absoluto que existe independentemente de qualquer corpo e do movimento dos mesmos, tal como o espaço absoluto.

De notar que o tempo relativo depende do que se considera um movimento periódico. O que a uma escala pode parecer um movimento periódico, comparando com outro movimento periódico de menor escala (menor período), pode revelar-se não-periódico. Assim o tempo relativo é sempre relativo a um movimento periódico que serve de referência assim como o espaço relativo é relativo a um corpo que serve de referência.

De notar também que o tempo relativo, tal como o espaço relativo, é aquele que se mede, sendo o tempo absoluto, tal como o espaço absoluto, uma noção abstracta, matemática, independente de qualquer movimento que possamos apreender.

### 1.3 Discussão em torno da existência do espaço absoluto e do movimento absoluto e da necessidade destes conceitos para a física de Newton

Embora seja fundamental para a mecânica de Newton, a ideia de que existe um espaço absoluto, independente de qualquer corpo que sirva de referência e no qual os corpos têm um movimento próprio, absoluto, essa nunca foi uma ideia consensual e desde Newton até aos nossos dias a necessidade ou não de se considerar a existência do espaço absoluto e do movimento absoluto permaneceu aberta à discussão.

O problema fundamental é que, como o próprio Newton admite que tudo o que podemos medir, no que toca ao espaço, são posições relativas, medidas sobre espaços relativos, que nos permitem obter medidas do movimento relativo, nunca medidas absolutas, apenas podemos saber da existência do espaço absoluto de forma indirecta.

Para Newton, o espaço absoluto manifesta-se por intermédio do movimento absoluto, o qual é distinguível do movimento relativo “pelas suas propriedades, causas e efeitos” [Newton, *Principia*, pág.411].

Quanto às propriedades temos que o movimento absoluto é descrito pelas leis da mecânica de Newton:

- A lei da inércia, segundo a qual, o estado de movimento ou repouso absoluto de um corpo não actuado por forças não se altera, ou seja, num referencial de inércia<sup>1</sup> um corpo não actuado por forças permanece em repouso ou em movimento rectilíneo uniforme;
- A lei fundamental da dinâmica segundo a qual, num referencial de inércia, ou seja, nos referenciais em que a lei de inércia se verifica, a alteração no estado de movimento de um corpo é devida à aplicação sobre este de forças e é tal que a variação da sua quantidade de movimento (produto da massa pela velocidade absoluta) se dá na

---

<sup>1</sup> Neste axioma, Newton está, coerentemente, a definir o mundo em que a sua física pode ser aplicada. A lei de inércia define os referenciais (de inércia) em que as suas leis funcionam. Daí a necessidade de introduzir um referencial de inércia privilegiado, associado aos conceitos de espaço e tempo absolutos, porque, existindo esse, existiriam uma infinidade deles, dado que todos os que se movessem com uma velocidade absoluta rectilínea e uniforme, em relação a esse referencial absoluto, seriam também referenciais de inércia.

direcção e sentido da força resultante (soma vectorial de todas as forças) e com intensidade igual à da força ( $\vec{F} = m\vec{a}$ );

- A lei da acção-reacção. Mais uma vez esta lei pressupõe a existência de referenciais de inércia, ao afirmar que, num referencial de inércia, qualquer acção (força) que se exerça sobre um corpo, recebe, por parte deste, uma reacção (força) de intensidade igual mas de sentido contrário.

Quanto às causas, Newton refere, que “o movimento verdadeiro [absoluto] não é gerado nem alterado, a não ser quando alguma força actuar sobre o corpo” [Newton, *Principia*, pág.412], ao passo que o movimento relativo pode ser gerado ou alterado simplesmente porque o corpo que lhe serve de referência mudou o seu estado de movimento.

Quando aos efeitos, o movimento absoluto manifesta-se por ser adequadamente descrito pelas leis de Newton.

Desde o início, Newton sabia que existiam sistemas de referência em que as suas leis do movimento eram válidas e sistemas de referência em que não eram.

Basta imaginar uma bola que possa rolar sem que exista atrito entre ela e o chão de um vagão, para perceber que em relação ao vagão se, por exemplo, este partir de uma posição de repouso e começar a acelerar, a bola não se move de acordo com as leis de Newton. Com efeito, neste caso, a bola move-se em relação ao vagão sem que nenhuma força seja aplicada sobre esta. Este é um caso simples que releva a importância dos referenciais de inércia na física newtoniana.

Foi para resolver o problema de haver referenciais em que as suas leis não eram válidas que Newton postulou a existência do espaço e tempo absolutos de modo a ter pelo menos um sistema de referência em que as suas leis fossem válidas.

A partir daí os sistemas de referência podem ser divididos em dois tipos:

- Os inerciais, em que as leis de Newton são válidas;
- Os não-inerciais onde as leis de Newton não são válidas a não ser que introduzamos aquilo a que é dado o nome de forças de inércia;

Newton esforçou-se para evidenciar a existência destes dois tipos de referenciais.

Mais, Newton pensou que, dando exemplos do que acontece em referenciais não inerciais, tinha demonstrado a existência do movimento absoluto, caracterizado pelas suas causas e efeitos.

No entanto, analisando com mais cuidado, verifica-se que nem as causas nem os efeitos que Newton defende que permitem distinguir o movimento relativo do absoluto, o fazem inequivocamente.

Com efeito, suponha-se que ao observar um corpo se verifica que este, num dado instante, começa a acelerar relativamente ao sistema de referência que se está a usar como base para a observação. Segundo Newton, poder-se-ia distinguir se a aceleração é ou não absoluta verificando respectivamente se sobre o corpo actua ou não alguma força que seja causa dessa aceleração. Podemos falar, no quadro da física newtoniana, em aceleração absoluta porque esta é um invariante para as transformações de Galileu. É isto que faz com que a 2ª lei de Newton seja válida em todos os referenciais de inércia. Mas é também isto que torna impossível à física newtoniana identificar empiricamente o referencial absoluto.

De facto, embora a mecânica de Newton, e com ela o conceito de movimento absoluto, num espaço e tempo absolutos, existentes por si mesmos, independentemente da matéria ou qualquer outra substância, tenha sido a prevalecente durante séculos (até ao advento da teoria da relatividade), outras noções de espaço e de movimento foram defendidas. Por exemplo, Gottfried Wilhelm Leibniz defendia que o espaço e o tempo seriam da ordem da relação; René Descartes e seus discípulos defendiam que o universo era constituído por um contínuo de matéria, sendo o espaço a extensão deste contínuo, e o movimento apenas movimento relativo, ou seja, variação da posição relativa, entre os corpúsculos; Michael Faraday, por seu lado, identificava o espaço com as forças, que existiriam por todo o espaço e constituiriam a matéria, ou pelo menos com o lugar onde estas forças existiriam distribuídas continuamente (sem que estas ocupem espaço, pois podem sobrepor-se num mesmo lugar) e também nunca falou de espaço ou movimento absoluto.

Além disso, críticas à necessidade dos conceitos de espaço absoluto, movimento absoluto e tempo absoluto, independentes da matéria, foram feitas por físicos e por filósofos, em particular pelo neopositivista Ernest Mach, que defendia que

tais conceitos eram metafísicos, não passíveis de qualquer tipo de evidência empírica, e deveriam, por esse motivo, ser banidos da física.

#### **1.4 Pontos materiais, sem extensão espacial, existentes num ponto do espaço em cada instante de tempo sem duração temporal**

Já vimos o que Newton entende por espaço, tempo e movimento absolutos e algumas questões que se levantam em torno destes conceitos. Vamos agora ver o que Newton considera que existe localizado no espaço e no tempo.

Para Newton, a matéria é caracterizada pela propriedade a que deu o nome de massa. A matéria é composta por pontos materiais, isto é, por corpúsculos que existem em cada instante de tempo sem duração temporal, num ponto do espaço, sem extensão espacial. Estes corpúsculos são impenetráveis ocupando assim o ponto do espaço em que se encontram. São indeformáveis – um ponto não se deforma – e são imutáveis – as suas propriedades não mudam, mesmo quando interactivam uns com os outros.

Desta forma, a mecânica newtoniana pode ser considerada como a cúpula do projecto epistemológico encetado por Galileu, quando este reduziu o objecto da física à mera descrição do movimento local. No quadro da mecânica newtoniana, todas as mudanças no universo passariam a reduzir-se a meras mudanças de posição, e à forma como essas mudanças se processariam.

#### **1.5 Forças aplicadas e forças centrais: abordagem matemática da acção à distância**

Vamos agora ver de que forma, segundo Newton, os corpúsculos materiais actuariam uns sobre os outros.

Os corpúsculos interactivariam uns com os outros por meio de “forças aplicadas” (*vis impressa*), que Newton define da seguinte forma: “Força aplicada é a acção exercida num corpo de modo a mudar ou o seu estado de repouso ou o seu estado de movimento rectilíneo uniforme” [Newton, *Principia*, pág. 405].

Estas podem ser de contacto, como a pressão, ou de acção à distância como a força gravítica.

Em todo o caso, quer sejam forças de contacto, quer sejam forças de acção à distância, as forças newtonianas têm as seguintes características:

- O seu efeito é sempre, de acordo com a segunda lei de Newton, e tendo em conta a constância da massa dos corpúsculos, o de acelerar os corpúsculos na direcção e sentido em que actuam.

- Dependem unicamente das propriedades dos corpúsculos, as quais não se alteram, e das suas posições relativas.

- A cada força exercida sobre um corpo, corresponde, uma reacção desse corpo com igual intensidade e sentido contrário (terceira Lei de Newton).

As forças de interacção à distância, constituem a novidade para a física, em matéria de forças. Newton classifica-as como forças centrais porque “os corpos são atraídos ou impelidos ou de qualquer forma tendem, em direcção a um ponto central” [Newton, *Principia*, pág. 405].

Dado que as forças resultam sempre da interacção de corpúsculos, ser atraído ou impelido em direcção a um centro é ser impelido na direcção de um corpo que está no centro, a menos que estejamos no caso em que vários corpos a constituírem um sistema central e cujo centro não coincide com nenhum deles.

Simplificando, na interacção entre dois corpos, as definições de Newton implicam que as forças centrais de interacção seriam forças que actuam segundo a direcção ou recta que une os dois corpos, sendo que cada um deles serve de centro à força que actua sobre o outro, de acordo com a 3ª lei de Newton.

No caso da gravitação, Newton postulou ainda que a intensidade dessa força variava com o inverso do quadrado da distância, tal como está expresso na sua lei da gravitação universal.

Note-se que Newton, na definição de força central, é propositadamente vago em relação à causa da força gravítica. A sua célebre frase “*hypothesis non fingo*” relaciona-se exactamente com este tema.

De facto, Newton escreve acerca da origem das forças centrais que esta pode ser referida a um centro “como tendo alguma causa sem a qual as forças motivas não seriam propagadas através das regiões circundantes, quer seja esta causa algum corpo



central (como um íman no centro da força magnética ou a terra no centro da força que produz a gravidade) quer seja alguma outra causa que não é aparente... [mas] este conceito é puramente matemático, pois eu não estou considerando quaisquer causas ou locais físicos das forças” [Newton, *Principia*, pág. 407]

Assim, Newton indica apenas as leis matemáticas que descrevem, em geral, a interação, desconsiderando, em parte, o seu significado físico.

## II. A situação da electricidade e do magnetismo antes do advento do electromagnetismo

Vimos que, para Newton, os pontos materiais interactuam à distância por meio de forças aplicadas. Vimos também que estas forças dependem unicamente das propriedades dos corpúsculos, as quais se mantêm constantes, e das suas posições relativas; são centrais, isto é, actuam ao longo da linha que une os dois corpos numa interacção; e, no caso da gravitação, a sua intensidade diminui com o quadrado da distância ao centro.

As conjecturas newtonianas do séc. XVIII acerca da electricidade e do magnetismo baseavam-se precisamente neste tipo de forças.

Os newtonianos do séc. XVIII e princípio do séc. XIX, mais precisamente, antes da descoberta, em 1820, por Oersted, da interacção entre as correntes e a agulha magnética, defendiam que, para além da força gravítica, existiriam, entre outras, a força eléctrica, responsável pelos fenómenos eléctricos e, de forma independente, a força magnética responsável pelos fenómenos magnéticos. Estas duas forças dever-se-iam respectivamente a corpúsculos com carga eléctrica e a corpúsculos com carga magnética.

Vamos agora enumerar os factos conhecidos nessa época e expor algumas conjecturas propostas que pretendiam explica-los.

Quanto à carga magnética, desde o século XIII que se sabia que cada íman possui dois pólos com carga magnética oposta, em que pólos com polaridades iguais se repelem, ao passo que pólos com polaridades opostas se atraem. Além disso conheciam-se, entre outras propriedades, que quando se secciona um íman, quer transversal, quer longitudinalmente, se obtêm dois ímanes com as mesmas propriedades do íman seccionado, ou seja, que não existem pólos magnéticos isolados (monopólos magnéticos). [Petrus Peregrinus, fl. 1269]

Para explicar a existência de ímanes, Charles-Augustin Coulomb admitiu que em cada molécula dos corpos magnéticos existiriam, em igual quantidade, dois fluidos magnéticos, cada um constituído por corpúsculos com sua polaridade. Os corpúsculos do mesmo fluido repelir-se-iam mutuamente e atrairiam os do outro fluido. Estes

fluidos estariam aprisionados na molécula, não podendo passar de umas moléculas para as outras, o que explica a impossibilidade de se obterem monopólos magnéticos. A magnetização consistiria no deslocamento dos dois fluidos para extremidades opostas da molécula. Coulomb deixa, contudo, por explicar como a magnetização se mantém dado que os fluidos opostos, existentes na molécula, deveriam atrair-se e não permanecerem em lados opostos dentro da molécula. A permanência do estado polarizado, sem que os fluidos opostos, existentes no interior na molécula se atraíam, é um caso típico de uma hipótese ad hoc.

Quanto à carga eléctrica, sabia-se que existem dois tipos de electricidade, a positiva e a negativa, com que os corpos podem ficar carregados quando friccionados. Sabia-se também que dois corpos eletrizados positivamente se repelem, dois corpos eletrizados negativamente também se repelem, e dois corpos eletrizados, um positivamente e outro negativamente atraem-se.

Além disso sabia-se que alguns materiais permitiam que um corpo eletrizado transmitisse, através deles, essa mesma eletrização a outros corpos. Estes materiais foram designados por condutores, e os que não tinham esta propriedade foram designados por isolantes ou, mais tarde, por dieléctricos.

Sabia-se ainda que, se entre dois corpos, opostamente eletrizados, se colocasse um isolante, surgiria, entre os dois corpos, uma certa diferença de potencial electrostático que, quando posteriormente os corpos fossem unidos por um condutor, daria origem a uma descarga eléctrica. Neste caso constrói-se um condensador. O primeiro condensador foi construído em 1745 por Pieter van Musschenbroek na Universidade de Leiden. Daí o nome de “garrafa” de Leiden já que tinha essa forma.

Finalmente, no tocante à electroestática, sabia-se que se um corpo eletrizado, positiva ou negativamente, chegar perto de outro não eletrizado, sendo o meio, entre os dois, isolante, a superfície deste que lhe fica mais próxima fica eletrizada, negativa ou positivamente, respectivamente. Isto é o que se chama indução electroestática.

Quanto às correntes eléctricas, em 1800, Alessandro Volta, descobriu como produzir corrente eléctrica continuamente. Volta colocou (embebeu) em ácido sulfúrico duas placas metálicas, uma de cobre e outra de zinco. Verificou depois que se entre as extremidades das placas se colocasse um condutor, se produzia no condutor

corrente eléctrica continua. Deu-se assim início ao estudo das correntes eléctricas ou, como foram chamadas, correntes galvânicas.

Falemos agora das duas tentativas para explicar os fenómenos electroestáticos, no quadro da metafísica newtoniana.

A primeira foi a de William Watson e Benjamim Franklin, que de forma independente, defenderam que existiria um único fluido eléctrico, distinto da matéria ordinária.

Todos os corpos possuiriam uma certa quantidade deste fluido, sendo que nos corpos electricamente neutros o fluido eléctrico teria a mesma densidade que a matéria.

Quando um corpo é friccionado por outro e fica electrizado, de acordo com esta conjectura, parte do fluido eléctrico é transferido de um corpo para o outro, ficando um dos corpos com excesso de fluido eléctrico e outro com fluido eléctrico a menos.

O excesso de fluido eléctrico ou a falta deste caracterizariam, respectivamente, os corpos electrizados positivamente e os corpos electrizados negativamente.

As partículas do fluido eléctrico repelir-se-iam mutuamente mas seriam atraídas pelas partículas de matéria. Assim, dois corpos electrizados positivamente repelir-se-iam devido à repulsão das partículas do fluido eléctrico existente em excesso nos dois. Já dois corpos electrizados um negativamente e o outro positivamente seriam atraídos devido à atracção entre a matéria em excesso num e o fluido eléctrico em excesso no outro.

Para explicar a repulsão de dois corpos electrizados negativamente, Franz Aepinus, um discípulo de Franklin, propôs que as partículas de matéria se repeliriam, o que chocou, como seria natural, os seus contemporâneos. Segundo ele, o facto de não se observar essa repulsão nos corpos neutros, e sim a atracção gravítica, dever-se-ia ao facto de a força repulsiva entre a matéria ser contrariada pela força atractiva entre a matéria e o fluido eléctrico. Um ligeiro desequilíbrio entre estas duas forças seria a causa da existência da força gravítica.

Quanto à distinção entre condutores e isolantes, Watson e Franklin supuseram que os condutores distinguir-se-iam dos isolantes por permitirem o livre movimento das partículas do fluido eléctrico. Quando um corpo electrizado é ligado a

outro por meio de um condutor as partículas eléctricas mover-se-iam, então, do corpo que tem mais fluido eléctrico para o que tem menos. Isto explica que um corpo possa transmitir a outro a sua electrificação. Explica também a descarga eléctrica entre dois corpos opostamente electrizados que são posteriormente ligados por um condutor.

Finalmente, esta proposta explica a indução electroestática admitindo que o fluido eléctrico de um corpo com excesso de fluido eléctrico (electrizado positivamente) afasta da superfície do outro o seu fluido eléctrico, tornando-a negativamente electrizada, e um corpo com excesso de matéria (electrizada negativamente) atrai o fluido eléctrico do outro para a sua superfície, tornando-a positivamente electrizada.

Quanto às correntes galvânicas estas não eram conhecidas por estes cientistas.

A outra tentativa de explicação foi proposta por Coulomb e desenvolvida por Siméon Poisson. Estes admitiram que, para além da matéria ordinária, existiriam na constituição dos corpos dois fluidos eléctricos: um cujas partículas possuem um tipo de carga, designada carga positiva, e outro cujas partículas possuem o tipo oposto de carga, designada carga negativa.

De acordo com esta conjectura, cargas do mesmo tipo repelir-se-iam, cargas contrárias atrair-se-iam, e os condutores distinguir-se-iam dos isolantes porque as partículas dos fluidos eléctricos se poderiam mover livremente através deles.

A explicação dos fenómenos electroestáticos processar-se-ia, no quadro desta conjectura, de forma semelhante à que referimos na conjectura anterior, substituindo o excesso de matéria ou de fluido eléctrico, pelo excesso, respectivamente, de cargas positivas ou negativas que se movem atraídas ou repelidas por outras cargas.

A principal diferença é que existem dois fluidos e, consequentemente, a descarga eléctrica passa a ser o movimento, em direcções opostas, dos dois fluidos eléctricos, as cargas positivas movendo-se do corpo positivamente carregado para o corpo negativamente carregado, e as cargas negativas movendo-se no sentido contrário.

As correntes galvânicas seriam o contínuo movimento dos fluidos eléctricos em direcções opostas.

Para terminar, importa notar que estas conjecturas foram, como veremos, abaladas pelas descobertas de Oersted e Faraday.

### III. A situação na óptica antes de se considerar parte do electromagnetismo

#### 3.1 Conceção Newtoniana da luz

Tal como tudo o resto, a luz seria, segundo Newton, composta por corpúsculos.

Não obstante, no seu livro *Opticks*, entre outros, Newton considerou também a existência de um éter, que preencheria todo o espaço e com o qual os corpúsculos de luz interactuariam provocando agitação e até oscilações dos corpúsculos etéreos com frequências características.

Esta conjectura acerca das interacções entre os corpúsculos de luz e o éter não foi, contudo, muito desenvolvida. Nem Newton alguma vez estabeleceu uma teoria digna desse nome, a partir de uma qualquer concepção de éter.

Por esse motivo, os seguidores de Newton passaram a considerar os fenómenos ópticos como exclusivamente associados a uma concepção corpuscular da luz.

#### 3.2 A teoria ondulatória de Young e Fresnel

Embora a maior parte dos filósofos do séc. XVIII defendesse que a luz era constituída por corpúsculos, em 1799, Thomas Young, um médico inglês, professor na Royal Institution, iniciou uma campanha em defesa de uma concepção ondulatória da luz. Pouco tempo depois, no princípio do sec. XIX, Augustin Fresnel, um engenheiro Francês, apresentou uma teoria ondulatória da luz que se impôs, porque conseguiu descrever todos os fenómenos ópticos conhecidos até então.

A concepção ondulatória da luz já havia sido defendida por René Descartes e desenvolvida por Christiaan Huygens no século XVII, ainda que num contexto metafísico ligeiramente diferente.

Descartes e Huygens tinham proposto que o universo seria um contínuo de matéria e identificado o espaço com a matéria. Para estes a luz seria constituída por vibrações que se propagariam nesse espaço identificado com a matéria.

Já para Young e Fresnel, bem como para outros que se lhes seguiram na análise de possíveis éteres luminíferos, a luz propagar-se-ia num éter que existiria no espaço absoluto newtoniano, e que preencheria todo o espaço absoluto não ocupado pela matéria ponderável. Este éter deveria ser decomponível em corpúsculos ou pontos materiais, pelo menos analiticamente, e estes últimos deveriam obedecer às leis da mecânica de Newton. Um éter assim designa-se por **éter mecânico**.

Além disso, enquanto para Descartes e Huygens as ondas de luz seriam ondas longitudinais, isto é, que se propagariam na mesma direcção em que vibrariam, tal como a compressão e descompressão de uma mola se propagam ao longo da mola, Young e Fresnel propuseram que as ondas de luz seriam ondas transversais, isto é, que, tal como as ondas do mar, se propagariam numa direcção perpendicular à vibração.

Em resumo, Young e Fresnel propuseram que a luz seria constituída por ondas transversais que se propagariam num éter mecânico.

### 3.2.1 A difracção

A difracção da luz é um fenómeno observado quando a luz passa por obstáculos ou fendas, e produz num alvo uma sucessão de riscas claras e escuras. Estas riscas aparecem também na orla das sombras dos objectos. Fresnel mostrou que a difracção se podia explicar com base na interferência entre ondas de luz.

De facto, ao nível da situação física, não existe uma distinção significativa entre o que usualmente se chama interferência ou difracção. São na essência o mesmo fenómeno. Tornou-se no entanto usual falar de interferência quando falamos da sobreposição de um número reduzido de ondas, e de difracção quando falamos da sobreposição de um grande número de ondas.

Fresnel explicou estes fenómenos tão eficazmente, a partir de uma concepção ondulatória da luz, que venceu em 1818 um concurso lançado pela Academia francesa,



para explicar a difracção da luz. Apesar do júri ser constituído por newtonianos zelosos como Pierre Laplace, a teoria de Fresnel permitia um tal acordo entre as suas previsões e as observações, que os newtonianos lhe atribuíram o prémio.

Inclusivamente, a teoria de Fresnel permitia prever a existência de um ponto luminoso no centro da sombra produzida por um objecto circular. Isto, de acordo com Poisson que levantou o problema, seria um resultado que refutaria a teoria de Fresnel. No entanto, a evidência empírica, constatada numa experiência promovida por François Arago, da existência desse ponto luminoso forneceu um forte contributo para a aceitação da sua teoria e permitiu-lhe vencer o concurso.

Para explicar a difracção, Fresnel usou duas assunções, o chamado princípio de Huygens e o conceito de interferência.

Mais precisamente, a teoria de Fresnel pressupunha que oscilações mecânicas com períodos bem definidos seriam a base das ondas de luz e que a propagação destas obedeceria ao princípio de Huygens, segundo o qual, cada ponto de uma frente de onda geraria ondas secundárias, que formariam a frente de onda seguinte, enquanto envolvente a essas ondas secundárias. Se a onda encontra um obstáculo ou um conjunto de fendas, os pontos da frente de onda nas extremidades do obstáculo ou, no caso das fendas, na zona de cada fenda, dão origem a ondas distintas, que se propagam coerentemente, mas a partir de pontos diferentes. Quando duas destas ondas se juntam, isto é, se cruzam num ponto, por exemplo, de um alvo, ocorre o fenómeno designado por interferência, em que as duas ondas se sobrepõem nesse ponto (algo que não poderia acontecer com corpúsculos), sendo o resultado da sobreposição dependente de uma característica própria das ondas no local de sobreposição: a fase de cada uma das ondas. Tal como acontece com as ondas num lago se as cristas de uma coincidirem com as cristas da outra as ondas reforçam-se. Mas se as cristas de uma coincidirem com as depressões da outra as ondas anulam-se. Desta forma surgem no referido alvo as referidas zonas claras e escuras. Fresnel explica assim a difracção/interferência da luz.

### 3.2.2 A polarização

A polarização constitui um dos motivos pelos quais Fresnel, a partir de uma sugestão de Young, feita em 1817, introduziu na sua teoria a ideia de que as ondas de luz fossem transversais.

Desde o tempo de Newton e Huygens que se sabia que certos cristais tinham o poder de produzir dois raios refractados em vez de um só. Além disso, os raios refractados por estes cristais quando novamente refractados por cristais do mesmo género podiam dar origem a um ou dois raios refractados dependendo da posição do plano principal de simetria do cristal em relação ao plano de incidência da luz.

Para explicar este fenómeno, Young notou que sendo transversais, ou seja, perpendiculares à direcção de propagação, as oscilações podem decompor-se em duas direcções perpendiculares entre si. Certos meios, como os cristais descritos, poderiam, então, fazer com que as oscilações numa dada direcção fossem refractadas de forma diferente das oscilações na direcção perpendicular a essa. Consequentemente, produziriam por refacção dois raios cujas oscilações se dariam em direcções bem definidas (polarização linear) e perpendiculares uma à outra. Por outras palavras, os cristais em que ocorre dupla refacção seriam cristais que decomporiam uma onda de luz, que não esteja polarizada linearmente em direcções paralela ou perpendicular ao plano de simetria principal do cristal, em duas ondas que oscilam em direcções bem definidas e perpendiculares entre si.

Em geral, os fenómenos de polarização, como a dupla refacção, são bem modelados por esta hipótese. Inclusivamente é possível polarizar dois raios de luz em direcções perpendiculares e verificar que não interferem, o que está de acordo com a teoria ondulatória da luz de Fresnel no que respeita à difracção.

### **3.2.3 As propriedades do éter e as dificuldades levantadas pelas características da propagação da luz**

A ideia de que a luz seriam ondas que se propagariam num éter mecânico impunha que os fenómenos ópticos pudessem ser deduzidos a partir das propriedades mecânicas do éter e, consequentemente, que se pudessem estabelecer essas propriedades. Como veremos, ninguém foi capaz de o fazer.

A principal dificuldade residia em explicar a propagação da luz em diferentes meios, a partir de uma concepção de um éter mecânico e das propriedades da própria matéria. Por exemplo, havia que explicar as diferentes velocidades da luz em diferentes meios materiais, a reflexão, a refração, por vezes dupla, a rotação do plano de polarização quando a luz atravessa certos materiais, etc... Conheciam-se as leis que descreviam esses fenómenos, mas nunca se conseguiu deduzi-las a partir de uma concepção de éter mecânico. Com efeito, várias conjecturas e modelos do éter, indicando propriedades do éter no interior e fora da matéria foram sendo propostas. No entanto, todas falharam em explicar um ou outra das características da propagação da luz.

Isto não é de surpreender dada a complexidade destes fenómenos que, como sabemos hoje, exigem muito mais que a mecânica newtoniana.

Por outro lado, a proposta de um éter que preencheria todo o espaço colocava também questões no quadro da mecânica. Como podiam os corpos mover-se através do éter sem, aparentemente, sofrerem resistência por parte deste? Arrastariam com eles o éter, ou mover-se-iam no meio dele sem o arrastar? Mais uma vez várias conjecturas foram propostas sem que nenhuma tivesse podido resolver o problema de forma consensual.

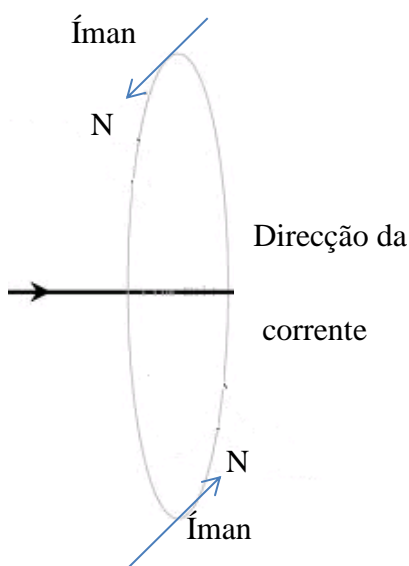
### **3.2.4 A teoria ondulatória da luz e a metafísica Newtoniana**

A emergência da teoria ondulatória da luz, tendo-se revelado muito mais eficaz que a concepção corpuscular da luz que os newtonianos tinham tentado transformar em teoria, constituiu o primeiro revés para a metafísica newtoniana, uma vez que eliminou a ideia newtoniana de espaço completamente vazio ou vácuo perfeito. No entanto, a mecânica newtoniana, bem como o essencial da sua ontologia, isto é, a existência de um espaço e um tempo absolutos onde se localizam pontos materiais ou partículas que interactivam à distância por meio de forças impressas que são a causa da aceleração absoluta dos mesmos, não foi abandonada, se não muito mais tarde e, mesmo assim, só em parte.

## IV. As descobertas de Oersted e Ampère: o início do electromagnetismo

O segundo revés para a metafísica newtoniana deu-se em 1820 quando Hans Christian Oersted, um cientista dinamarquês, descobriu a interacção entre uma corrente eléctrica e um íman.

Mais precisamente, Oersted descobriu que quando uma agulha magnética era colocada paralelamente a um fio condutor, e quando se fazia passar uma corrente eléctrica neste, essa agulha rodava de modo a aproximar-se da direcção perpendicular à corrente, ficando com o pólo norte virado para um lado, se fosse colocado por baixo da corrente, e para o lado contrário, se fosse colocado por cima da corrente, como se pode ver figura seguinte, a qual indica também a linha que tem por tangente em cada ponto, a direcção em que o íman se alinha, linha essa que é designada de linha de força magnética.



*Figura 1 - Alinhamento de um íman perto de uma corrente eléctrica em que o sentido é indicado pela seta. O íman alinha-se na direcção tangente à circunferência marcada a azul, com o pólo Norte apontado no sentido indicado pelas setas.*

O facto de uma corrente eléctrica ser capaz de interagir com um corpo magnético estabeleceu, pela primeira vez, uma relação entre duas propriedades da matéria até então independentes entre si. Começara a nascer o electromagnetismo.

Além disso, a interacção entre a corrente e o íman foge do quadro da metafísica newtoniana, dado que esta supunha que as acções à distância corresponderiam sempre a forças centrais. Não era o que se observava neste caso. Na verdade, a força que uma corrente eléctrica exerce num íman, a qual tem a direcção e o sentido em que o íman se alinha, é, como se pode ver na figura anterior, sempre perpendicular, quer à direcção da corrente, quer à linha que liga o íman à corrente.

Para resolver este problema e adaptar as anteriores conjecturas da electricidade e do magnetismo à nova descoberta, o francês André-Marie Ampère propôs que se eliminasse a anterior concepção do magnetismo e, mantendo a anterior conjectura acerca da electroestática baseada na existência de dois fluidos eléctricos, se postulasse que um íman tem, na sua constituição, correntes eléctricas circulares em torno do seu eixo.

Ampère propôs também que a força magnética seria uma força de atracção ou repulsão de correntes, sendo que cada porção infinitesimal de corrente iria atrair ou repelir outra porção infinitesimal de corrente com uma força dependente da intensidade das correntes, da distância entre estas e do ângulo entre as direcções dos dois elementos de corrente.

Com esta conjectura, Ampère explicou quer a atracção e repulsão de ímanes, já conhecida, quer a interacção entre correntes e ímanes, descoberta por Oersted, quer a atracção e repulsão de correntes, descoberta pelo próprio Ampère.

No entanto, Ampère não conseguiu, apesar de ele próprio ser originalmente um newtoniano, compatibilizar a sua conjectura com a metafísica newtoniana. Com efeito, apesar de a força magnética, no quadro metafísico estabelecido por Ampère, ser uma força central de acção à distância, havia o problema de essa força depender da direcção das correntes e não apenas da sua posição relativa, como exigia a metafísica de Newton.

Constatamos assim que esta conjectura constituiu um desvio relativamente à metafísica de Newton, e começou a evidenciar as dificuldades desta em descrever os fenómenos electromagnéticos.

Por outro lado, esta conjectura não estabelece de forma clara o nexo causal entre o movimento das cargas eléctricas e a existência de forças magnéticas.

## V. A interpretação de Faraday dos fenómenos electromagnéticos.

### 5.1 O início da investigação de Faraday

Um ano depois das descobertas de Oersted e Ampère, ou seja, em 1821, Michael Faraday, assistente do químico Humphrey Davy, no laboratório da Royal Institution, foi convidado a fazer uma revisão do electromagnetismo, ou seja, das descobertas feitas e das interpretações propostas neste novo ramo da física.

Faraday não só fez a revisão que lhe foi pedida, mas também, ao repetir as experiências de Oersted, descobriu um novo fenómeno, nomeadamente, que uma corrente eléctrica roda continuamente em torno do pólo de um íman e vice-versa, como se pode ver na figura seguinte:

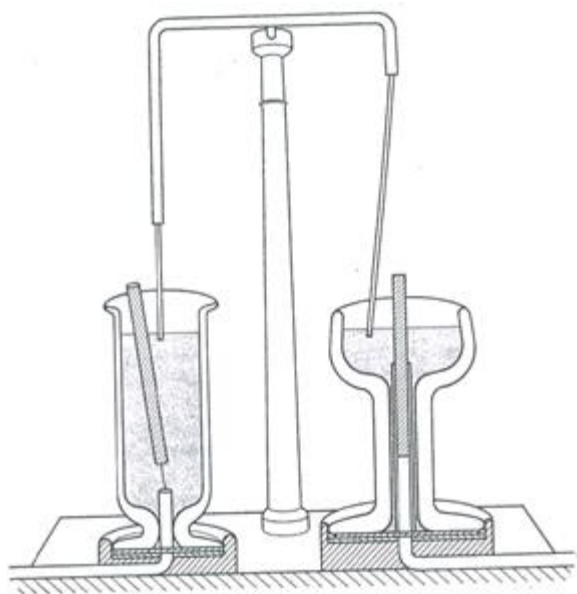


Figura 2 - Rotação de um íman em torno de uma corrente eléctrica e vice-versa. Do lado esquerdo, podemos ver um íman mergulhado em mercúrio, que roda em torno de um fio condutor por onde passa corrente, e que é posto em contacto com o mercúrio. Do lado direito, podemos ver um fio condutor por onde passa corrente, e que é posto em contacto com mercúrio, rodar em torno de um íman mergulhado no mesmo mercúrio.

A estas rotações Faraday chamou rotações electromagnéticas.

Esta foi a primeira descoberta de Faraday na área do electromagnetismo.

Importa aqui referir que Faraday era um autodidacta. Tendo apenas a escola primária, o seu primeiro emprego foi como encadernador. Aí começou a ler livros de ciência e filosofia e a assistir a palestras. A certa altura conseguiu um bilhete para assistir a uma palestra de Davy. Enviou, depois, uma carta a Davy pedindo emprego no laboratório, à qual juntou os seus apontamentos da palestra dada por Davy. Davy marcou uma entrevista com Faraday e pouco tempo depois recomendou-o para trabalhar como assistente no laboratório. Apenas três anos depois de começar a trabalhar com Davy, Faraday começou a dar palestras e a publicar artigos em química.

Como nunca frequentara a universidade, Faraday tinha poucos conhecimentos de matemática e conhecia apenas modestamente a metafísica de Newton.

Isso permitiu-lhe não ficar constrangido pela metafísica de Newton. Podemos mesmo afirmar que, desde o início da sua carreira científica, se opôs a esta.

Com efeito, logo no seu primeiro ciclo de palestras, Faraday fez referência a uma concepção não-newtoniana da matéria e criticou a ideia newtoniana de que os fenómenos eléctricos se devessem a fluidos eléctricos, à parte da matéria.

Mais precisamente, Faraday afirmou que “a ideia de solidez”, ou seja, a ideia newtoniana de pontos materiais impenetráveis, “foi contestada ... por uma teoria... que supõe que a matéria é apenas uma colecção de pontos matemáticos de atracção e repulsão ... [os quais] não têm extensão nem solidez ... [sendo que] se fosse possível vencer as forças repulsivas e atractivas, duas porções de matéria poderiam coexistir no mesmo lugar” [Citação retirada de: Berkson, 1974, capítulo 1, nota 14, pág.342, a tradução para português é minha].

Aqui Faraday está a referir-se à ideia defendida, entre outros, por Leibniz, Immanuel Kant e Roger Boscovich, de que a matéria seria constituída por centros de força atractiva e repulsiva, sendo a sua solidez e impenetrabilidade devida à força repulsiva.

Quanto aos fluidos eléctricos Faraday diz: “A existência deste fluido [eléctrico] é, no entanto, inteiramente hipotética, e os efeitos podem talvez ser dependentes de alguma propriedade comum a toda a matéria; e isto é mais provável porque não há nenhuma matéria conhecida, senão aquela que em certas circunstâncias pode ser levada a exhibir estes fenómenos [eléctricos].” [Citação retirada de: Berkson, 1974, pág.33; a tradução para português é minha].



Não é, pois, de admirar que Faraday tenha interpretado a sua descoberta das rotações electromagnéticas de uma forma diferente da interpretação newtoniana do electromagnetismo feita por Ampère, a quem sempre se opôs, mais ou menos explicitamente, por este adoptar as concepções newtonianas, assumindo a existência de fluidos eléctricos e a possibilidade de acção instantânea à distância, algo que, como veremos, Faraday combateu vivamente.

Na verdade, Faraday, ao observar as rotações da corrente eléctrica em torno do pólo do íman, pensou que estas não encaixavam propriamente na explicação de Ampère da atracção e repulsão de correntes, uma vez que não se observava o íman a ser atraído ou repellido pela corrente eléctrica, mas sim a rodar em torno desta e vice-versa.

Em vez da explicação de Ampère, Faraday propôs que uma corrente eléctrica teria, em si mesma, a polaridade norte e a polaridade sul. Uma das polaridades da corrente eléctrica atrairia e seria atraída pelo pólo do íman e a outra repeliria e seria repelida pelo mesmo, o que faria a corrente eléctrica rodar em torno do pólo do íman e vice-versa.

Além disso, Faraday, na sua revisão do electromagnetismo, notou que “não temos nenhuma prova da materialidade da electricidade ou da existência de qualquer corrente no fio condutor” [Faraday, 1821, pág. 196] e fez referência à possibilidade de esta última ser “a indução de um estado particular nas suas [do fio condutor] partes” [Faraday, 1821, pág. 197].

Repare-se que Faraday está a falar de um estado do fio condutor, ou melhor, da matéria constituinte do fio condutor. Esta ideia de estados da matéria não faz sentido no quadro da metafísica newtoniana. Faz, no entanto, sentido se considerarmos que a matéria é constituída por centros de força, pois, então, a distribuição de forças em torno dos centros de força determina o estado da matéria.

Importa também notar que Ampère tratou logo de explicar as rotações electromagnéticas em termos da sua própria ontologia, algo que, por sinal, Faraday previu que acontecesse.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Ver carta a De La Rive, 1821, citada Jones, 1870, volume 1, págs. 354-357, final da pág.355

## 5.2 Indução electromagnética

### 5.2.1 Descoberta da indução electromagnética e conjecturas propostas

Dez anos depois da descoberta das rotações electromagnéticas, mais precisamente, no final de 1831, Faraday fez a descoberta pela qual é mais conhecido: a descoberta da indução electromagnética.

O artigo onde a descoberta é anunciada, publicado na primeira série das famosas *Experimental Researches in Electricity*, abre com a definição de Faraday do termo indução no contexto das correntes eléctricas. Faraday escreveu:

“ O termo geral Indução ... pode ... ser usado ... para expressar o poder que as correntes eléctricas possam ter de induzir um qualquer estado particular na matéria existente na sua vizinhança imediata ... É com este significado que eu me proponho usá-lo neste artigo” [E.R., §1]<sup>3</sup>.

Segundo o próprio nos diz, Faraday achou estranho que “uma vez que a corrente eléctrica era acompanhada por uma correspondente intensidade da acção magnética [como o demonstram as experiências de Oersted] ... bons condutores de electricidade, quando colocados na esfera desta acção, não tivessem nenhuma corrente induzida neles ou algum efeito sensível produzido equivalente em força a tal corrente.” [E.R., §3] Por outras palavras, Faraday achou estranho que se uma corrente eléctrica afectava um íman, o reverso, isto é, um íman afectar uma corrente eléctrica ou um bom condutor, não acontecesse.

Isto levou Faraday, segundo o próprio diz, “a investigar experimentalmente o efeito indutivo das correntes eléctricas.” [E.R., §4]

No final de 1831, Faraday, após algumas tentativas falhadas, encontrou finalmente este efeito e, segundo nos diz, descobriu um novo estado da matéria, que denominou estado electrotónico (em inglês, “electro-tonic state”).

Na sua primeira experiência com resultado positivo, Faraday usou um anel de ferro, em torno do qual enrolou, de um lado, um fio condutor que ligou a uma bateria

---

<sup>3</sup> Esta é a forma abreviada de escrever “Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, parágrafo 1”. Daqui por diante as citações referentes a parágrafos numerados das *Experimental Researches in Electricity* terão a forma [E.R., § número do parágrafo]

e, do outro, um fio condutor ligado a um galvanómetro. No instante em que o fio condutor foi ligado à bateria observou-se uma deflexão do ponteiro do galvanómetro, após a qual, este último retornou à posição original. No instante em que se desligou o fio condutor da bateria observou-se uma deflexão, em sentido contrário, do ponteiro do galvanómetro. Faraday verificou, assim, que a magnetização e desmagnetização do ferro, produzida pelo ligar e desligar da corrente eléctrica, era a causa da indução de corrente eléctrica num fio condutor (secundário) próximo do primeiro (primário).

Fazendo mais experiências, Faraday verificou que também ocorria indução electromagnética se em vez enrolados em torno do ferro, os dois fios condutores fossem enrolados em torno de um pedaço de madeira. Neste caso o efeito era, contudo, menor. Isto mostra que o ligar ou desligar de uma corrente perto de um condutor causa, por si mesmo, o aparecimento de uma corrente induzida num condutor vizinho.

Prosseguindo as experiências, Faraday verificou também que a variação da intensidade de uma corrente eléctrica ou inversão da mesma, bem como a inversão de um electroíman, perto de um condutor, causa o aparecimento de corrente eléctrica induzida nesse condutor.

Faraday verificou ainda que ocorria indução electromagnética quando uma corrente ou íman se afastava ou aproximava de um condutor eléctrico.

Inicialmente, Faraday interpretou este fenómeno supondo que a matéria, quando actuada pela força magnética, ficaria num estado de tensão, o dito estado electrotónico. Quando se varia a distância entre uma corrente eléctrica ou um íman e um condutor, quando se magnetiza, se desmagnetiza ou se inverte um electroíman ou ainda quando se liga, se desliga, se inverte o sentido de uma corrente, ou se varia a sua intensidade na vizinhança de um condutor, a intensidade da força magnética sobre este último varia e o seu estado electrotónico varia também. **A variação do estado electrotónico seria, segundo Faraday, a causa da corrente eléctrica induzida.**

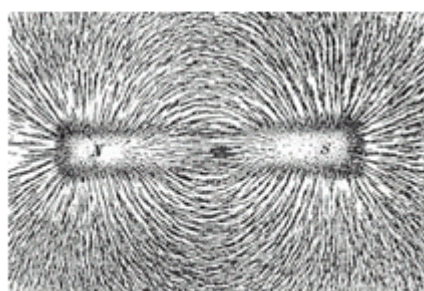
De notar que, para Faraday, como veremos mais à frente, um estado de tensão é um estado alterado da matéria devido à acção de uma força e que só se mantém enquanto a força existe. O estado electrotónico é um estado de tensão na medida em que é um estado da matéria que permanece apenas enquanto sobre esta actua uma força, a força magnética.

Importa agora notar que ao investigar mais a fundo a questão da indução electromagnética, Faraday teve de alterar a sua ideia inicial.

Com efeito, uns meses depois, no início de 1832 ou pouco antes, como atesta a segunda série das *Experimental Researches*, Faraday descobriu que a indução de correntes estava intimamente relacionada com o movimento do condutor em relação às linhas de força magnética, que são as linhas que têm por tangente, em cada ponto, a força magnética exercida sobre um íman colocado nesse ponto e têm o sentido dado pela direcção norte do íman.

A figura seguinte ilustra estas linhas:

Linhas de força desenhadas por limalha que se orienta na direcção em que a força magnética actua



Linhas de força desenhadas graficamente. A força magnética em cada ponto é tangente às linhas

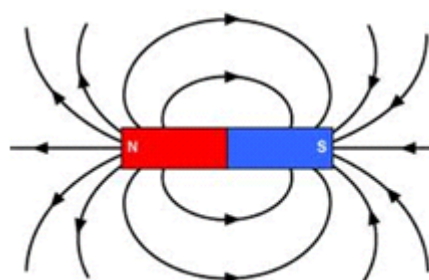


Figura 3 - Linhas de força magnética, à esquerda pela limalha de ferro, e à direita desenhadas graficamente.

Ao observar que o movimento relativo das linhas de força e do condutor provoca o aparecimento de corrente eléctrica neste, Faraday questionou-se, então, “se era essencial que a parte do fio [condutor] que se move ... atravessasse posições de diferentes intensidades de força magnética, ou se, interceptando apenas curvas de igual intensidade magnética, o mero movimento seria suficiente para a produção de corrente” [E.R., §217].

Faraday descobriu que a última possibilidade era a verdadeira. Mais precisamente, Faraday descobriu que sempre que um condutor, no seu movimento em relação às linhas de força, cortava ou era cortado por linhas de força magnética, movendo-se relativamente a estas sem ser ao longo das mesmas, independentemente da intensidade das linhas, surgia nele uma corrente eléctrica induzida. A direcção da

corrente eléctrica induzida era também determinada pela direcção do movimento relativo entre o condutor e as linhas de força interceptadas, sendo perpendicular quer às linhas de força, quer à direcção do movimento (daí que o fio condutor não devesse ser movido ao longo das linhas de força, pois nesse caso a corrente seria perpendicular ao fio condutor e portanto não se geraria corrente no fio).

Faraday considerou, então, que **a intercepção de curvas magnéticas pelo condutor em movimento através das mesmas, ou do condutor pelas curvas magnéticas em movimento através deste, seria a causa da corrente induzida**, desfazendo-se, assim, da sua anterior conjectura da existência do estado electrotónico.

De facto, Faraday escreve: “A lei segundo a qual a corrente induzida ... depende da intercepção de curvas magnéticas pelo metal [condutor] ... por fornecer uma razão perfeita para os efeitos produzidos, retira qualquer motivo para supor essa condição particular que me aventurei a chamar estado electrotónico” [E.R., §231].

### 5.2.2 Aplicação da conjectura final sobre a indução electromagnética

Depois de renunciar à conjectura da existência do estado electrotónico, Faraday passa a explicar como a lei que relaciona as correntes induzidas com a intercepção do condutor pelas linhas de força, e vice-versa, se aplica nas diferentes situações.

No caso em que a corrente induzida se deve ao movimento relativo entre um condutor e uma corrente ou um íman na sua vizinhança, a aplicação é evidente.

Nos casos em que a indução electromagnética se deve à magnetização ou desmagnetização de um electroíman, perto do condutor, ou ao ligar ou ao desligar de uma corrente perto do mesmo, Faraday diz-nos que “neste caso as curvas magnéticas têm de ser consideradas como estando em movimento atravessando o fio condutor sob indução” [E.R., §238].

Mais precisamente, no caso em que a corrente induzida é gerada pelo ligar de uma corrente na sua vizinhança, as curvas magnéticas estariam a mover-se “desde que se começaram a desenvolver até a força magnética da corrente atingir o seu máximo;

expandindo-se para fora do fio condutor” [E.R., §238]. Quando a corrente é desligada e se gera também uma corrente induzida num condutor vizinho “ as curvas magnéticas ... podem ser concebidas como contraindo-se em direcção à decadente corrente eléctrica” [E.R., §238].

Similarmente, a situação de magnetização ou de desmagnetização de um electroíman pode ser interpretada como correspondendo ao movimento das curvas magnéticas para fora ou na direcção desse electroíman, as quais, ao atravessar um condutor vizinho, causam a indução de uma corrente neste.

A situação de inversão de um electroíman pode ser interpretada como a desmagnetização do electroíman seguida da magnetização desse mesmo electroíman com polarização contrária. Analogamente, a situação de inversão do sentido de uma corrente pode ser interpretada como o desligar da corrente, seguido do ligar dessa mesma corrente em sentido contrário.

A indução electromagnética, que se observa quando se varia a intensidade da corrente eléctrica na vizinhança de um condutor, seria devida à expansão ou contracção das linhas de força magnética, consoante a intensidade da corrente aumente ou diminua.

Finalmente, importa notar que, se uma corrente variar de intensidade, além de surgir corrente eléctrica induzida num condutor vizinho, surge também uma corrente eléctrica induzida no próprio condutor que suporta a corrente variável. Este último fenómeno, que só mais tarde foi descoberto, designa-se por auto-indução. Neste caso, as linhas de força devem também considerar-se como estando a expandir-se ou a contrair-se consoante a intensidade da corrente aumente ou diminua. Na sua expansão ou contracção interceptam o próprio condutor, ficando assim explicada, à luz da proposta de Faraday, a auto-indução.

### **5.3 Interpretação de Faraday versus interpretação dos newtonianos das linhas de força.**

No mesmo ano (1832) em que publicou o seu trabalho sobre a indução electromagnética, Faraday enviou uma nota à Royal Institution em que afirmou o seguinte:

“Alguns dos resultados das investigações que estão incorporados nos dois artigos intitulados *Experimental Researches in Electricity* [os artigos em que Faraday publica respectivamente a primeira e a segunda conjecturas sobre a indução electromagnética] ... levaram-me a acreditar que a acção magnética é progressiva e requer tempo; isto é, que quando um íman actua sobre um íman distante ou um bocado de ferro, a causa influenciadora (que posso por agora chamar magnetismo) progride gradualmente a partir dos corpos magnéticos e requer tempo para a sua transmissão...

Penso também que existe razão para supor que a indução eléctrica (de tensão [electroestática]) é também realizada, de forma semelhante, gradualmente no tempo” [citação retirada de: Berkson, 1974, pág.73].

Aqui, ao contrário do que acontece nos primeiros artigos das *Experimental Researches*, Faraday opõem-se explicitamente à ideia newtoniana de acção à distância, propondo que a acção eléctrica e a acção magnética, em vez de serem forças de acção à distância, deveriam corresponder a uma acção que se propagasse.

O facto de Faraday ter relacionado a sua convicção de que a acção magnética e eléctrica é progressiva com a sua recente descoberta da indução electromagnética, juntamente com o facto de antes, na sua análise teórica deste mesmo fenómeno, ter defendido que a partir do momento em que a corrente eléctrica é gerada, as linhas de força magnética movem-se, expandindo-se a partir desta; estes dois factos permitem-nos supor que Faraday entendia as linhas de força, em particular o seu movimento, não meramente como uma descrição gráfica útil, mas como algo real que realmente se move, ou, no mínimo, como uma representação do real movimento ou propagação da acção ou força através do espaço<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Faraday teve o cuidado de apresentar as linhas de força como representações das forças, de modo a que pudessem ser interpretadas de diferentes formas. No entanto, Faraday tratou, em várias circunstâncias, estas linhas como objectos reais, atribuindo-lhes realidade física. Estas diferenças serão analisadas mais à frente, mas, em todo o caso, noto que as linhas de força, em Faraday, podem sempre ser consideradas como representações da força, sem que as ideias de Faraday percam coerência, desde que se tenha em conta que, para Faraday, a força é algo de muito diferente do que é para os newtonianos, nomeadamente, algo que se move, progredindo através do espaço ou meio entre os

Esta é a diferença crucial entre a interpretação newtoniana das linhas de força e o ponto de vista de Faraday acerca destas: enquanto para os newtonianos as linhas de força representam uma acção à distância, que é aplicada instantaneamente a todos os ímanes, correntes ou corpos carregados, por mais distantes que estejam, para Faraday as linhas de força representam uma acção ou força que se propaga através do espaço e que só surte efeito ao fim de algum tempo em ímanes, correntes ou corpos carregados, que estejam distantes; uma força que existe não só aplicada nos corpos interactuantes mas também no espaço entre estes.

De notar também que a estas duas concepções das linhas de força correspondem representações gráficas, à partida, ligeiramente diferentes: enquanto para os newtonianos, as linhas de força seriam representadas em todo o espaço, representando a força que actuaria instantaneamente num íman, corrente ou corpo carregado, existente em qualquer ponto desse espaço, para Faraday as linhas de força seriam representadas apenas na região do espaço até onde a acção ou força se propagara, sendo esta região cada vez maior à medida que o tempo passa e essa acção se continuar a propagar, mas nunca na totalidade do espaço.

Finalmente importa notar que, embora para os newtonianos a força tivesse como único efeito a aceleração dos corpúsculos, para Faraday pode haver outros efeitos para além deste, nomeadamente a indução de um estado na matéria, como o estado electrotónico, ou outro do mesmo género.

## 5.4 Investigação dos fenómenos electroquímicos

Durante os anos que se seguiram à descoberta da indução electromagnética, Faraday trabalhou sobretudo em electroquímica e em electroestática.

De início, ano de 1832, Faraday tratou de mostrar que as correntes eléctricas produzidas por diferentes meios, nomeadamente por pilhas voltaicas, por descarga eléctrica entre dois corpos ou por animais, etc., são capazes exactamente dos mesmos efeitos, podendo assim considerar-se idênticas.

---

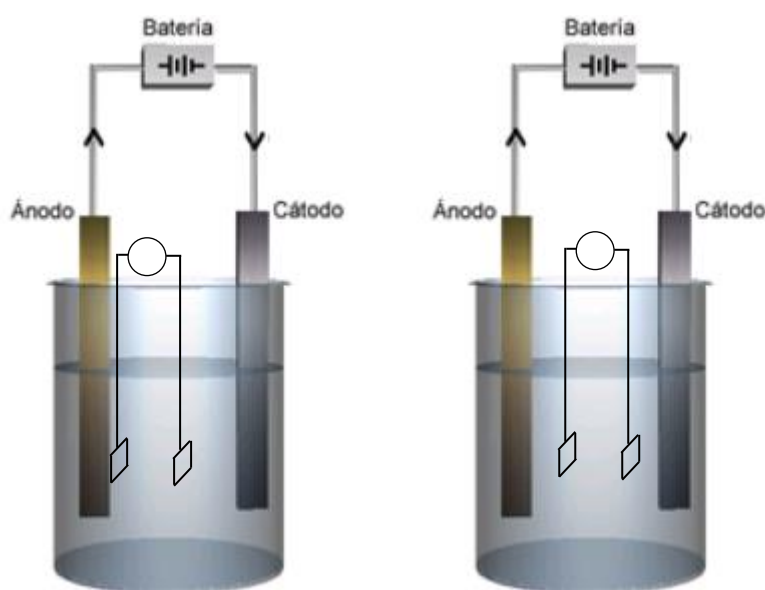
objectos interactuantes, e que existe neste espaço ou meio, ao contrário da força newtoniana que actua à distância e existe apenas aplicada aos corpúsculos.



Em particular, Faraday mostrou que se a corrente eléctrica tivesse a mesma intensidade de força magnética, ou seja, de acordo com o que sabemos hoje, a mesma intensidade de corrente, produzia a mesma decomposição electroquímica, quer fosse produzida por uma pilha, quer por uma descarga eléctrica entre dois corpos, sendo o grau de decomposição proporcional à intensidade da corrente eléctrica<sup>5</sup>.

De seguida, no ano de 1833, Faraday tratou de investigar as causas e o processo físico-químico da decomposição electroquímica. Faraday mostrou então que as concepções newtonianas sobre electroquímica, considerando que a decomposição electroquímica se devia unicamente à acção à distância dos pólos, deviam estar erradas.

Para o efeito, Faraday colocou entre dois eléctrodos uma solução ácida. Depois revestiu os terminais de um galvanómetro com folhas metálicas e introduziu-os na solução ácida. Mantendo uma distância fixa entre os terminais, Faraday mediu a corrente eléctrica perto de um dos eléctrodos e a meio da solução.



*Figura 4: Amperímetro com as extremidades mergulhadas numa solução ácida sujeita a electrólise. À esquerda o amperímetro está colocado próximo do ânodo, à direita está a meio entre o ânodo e o cátodo.*

<sup>5</sup> A força magnética produzida por uma corrente é, na verdade, proporcional à intensidade da corrente. Faraday, no entanto, julgou que seria proporcional à quantidade de electricidade/carga que passa no fio condutor, afirmando que “o poder químico, como a força magnética, é directamente proporcional à quantidade absoluta de electricidade que passa” [E.R., 377]

Se a decomposição electroquímica se devesse, como os newtonianos afirmavam, unicamente à acção à distância dos eléctrodos sobre as partículas do electrólito, então a diferença de potencial electrostático entre os terminais do galvanómetro deveria ser maior se os terminais estivessem próximos de um dos eléctrodos do que se estivessem a meia distância entre os eléctrodos.

Com efeito, junto aos eléctrodos o decaimento da força eléctrica com a distância aos eléctrodos é maior, implicando uma maior diferença de potencial, que no meio, onde não é sensível o decaimento da força eléctrica.

Consequentemente, a intensidade da corrente eléctrica, medida pelo galvanómetro, deveria, de acordo com as concepções dos newtonianos, ser maior junto a um dos eléctrodos do que a meio da solução.

No entanto, a experiência realizada por Faraday mostrou que a intensidade da corrente era a mesma junto a um dos pólos e a meio da solução, contrariamente ao que as concepções newtonianas previam.

Faraday refutou assim as concepções newtonianas. Não refutou, contudo, a ideia de acção à distância. De facto, o resultado anterior poderia ser explicado, fora do quadro inicialmente adoptado pelos newtonianos, por interacção à distância das partículas constituintes, não só dos eléctrodos, mas também do electrólito, o que faria com que a intensidade das linhas de força se mantivesse grosseiramente constante ao longo de toda a distância entre os eléctrodos.

De qualquer forma, Faraday tendo mostrado a correcção das concepções newtonianas, sentiu-se livre para propor uma visão alternativa do problema, segundo a qual seria a corrente eléctrica, e não a acção à distância dos eléctrodos, que provocaria a decomposição electroquímica, através de uma cadeia de decomposições e recombinações químicas.

Mais precisamente, segundo Faraday, a passagem da corrente provocaria, na direcção da corrente, uma diminuição da afinidade química entre os elementos que compõem as moléculas, levando a que, por exemplo, o hidrogénio numa molécula de água fosse menos atraído pelo átomo de oxigénio da molécula em que se encontra do que pelo átomo de oxigénio de uma molécula vizinha. Seria essa força maior na direcção de um átomo vizinho do que na ligação química vigente, que levaria à decomposição da molécula e iniciaria uma cadeia de decomposições e recombinações

químicas, que terminaria com a expulsão, junto aos eléctrodos, dos átomos de hidrogénio das moléculas de água contíguas a esses eléctrodos, numa quantidade proporcional à intensidade da corrente eléctrica.

Contrariamente ao que defendiam os newtonianos, para Faraday existiria uma acção por contiguidade e não uma acção à distância.

## 5.5 Electroestática como acção por contiguidade

### 5.5.1 Início da investigação em electroestática

Segundo o próprio diz, foi durante as investigações em electroquímica, que surgiu a Faraday a ideia de uma electroestática não de acção à distância mas de acção por contacto.

Mais precisamente, no ano de 1833, Faraday descobriu que, ao contrário da água no seu estado líquido, o gelo não é decomposto electroquimicamente, pelo menos nas mesmas condições em que a água o é.

Pelo contrário, o gelo é um não-condutor e portanto quando é colocado entre duas folhas metálicas e estas são ligadas a uma bateria, as folhas metálicas ficam carregadas, como num condensador vulgar.<sup>6</sup>

À medida que o gelo funde, notou Faraday, a carga das folhas diminui, sendo o grau de descarga proporcional ao grau de decomposição da água.

Foram estas observações que levaram Faraday a transpor para a electroestática as suas ideias sobre electroquímica. Como dissemos, estas baseavam-se na concepção de que se tratariam de acções por contiguidade e não de acções à distância.

De facto, no final do ano de 1837, Faraday publicou um artigo sobre electroestática (o primeiro de quatro, publicados como as séries 11<sup>a</sup> a 14<sup>a</sup> das *Experimental Researches*) em que inicia as suas considerações sobre esta matéria da seguinte forma:

---

<sup>6</sup> Recorde-se que um condensador é simplesmente um conjunto de dois condutores separados por um isolante. Quando se fixa a voltagem do condensador os condutores ficam carregados com cargas opostas pois de outro modo a tensão aos bordos, isto é, entre os corpos, seria nula. É evidente que a bateria tem pólos carregados que transferem carga para as folhas metálicas carregando assim o condensador.

“Quando descobri o facto geral de que os electrólitos, quando no estado sólido, se recusam a dar os seus elementos a uma corrente, embora os dessem livremente no estado líquido, pensei ter visto uma chave para a explicação da acção indutiva, e a possível subjugação de muitos fenómenos diferentes a uma só lei ... [pois] na acção electrolítica, a indução parecia ser o *primeiro* passo, e a *decomposição o segundo* (estando nas nossas mãos o poder de separar estes estados um do outro por colocar o electrólito no estado sólido ou líquido); ... e como o efeito global no electrólito parecia ser uma acção de partículas levadas a um estado peculiar ou estado polarizado [o estado de diferente afinidade química em que, segundo Faraday, a corrente eléctrica as deixa] fui levado a suspeitar que a indução comum [indução electroestática] seria, ela própria, em todos os casos, uma acção de partículas contíguas ... consistindo numa espécie de polaridade, em vez de ser uma acção de partículas ou massas a distâncias sensíveis” [E.R., §1164,§1165]

Portanto, para Faraday, a indução eléctrica ocorreria sempre, quer num condensador em que as superfícies metálicas em contacto com os pólos da bateria ficam carregadas, quer num electrólito em que passa corrente eléctrica entre os dois eléctrodos. No caso da decomposição electroquímica o primeiro passo seria a indução eléctrica e só depois se daria a decomposição electroquímica.

Além disso, em ambos os casos as partículas do meio ficariam num estado alterado que precederia a descarga eléctrica ou a decomposição química, o que está de acordo com as suas anteriores concepções sobre decomposição electroquímica. No caso electroestático, Faraday chamou ao estado alterado estado polarizado.

O referido estado polarizado seria, então, o estado quer das partículas do electrólito, antes da electrólise, quer das partículas no dieléctrico no condensador, sendo a causa da carga no condensador.

Como a electrólise seria devida a uma acção de contiguidade, a indução de carga num condensador, e a indução electroestática em geral, dever-se-iam também a acções por contiguidade.

### 5.5.2 Três questões sobre os fenómenos electroestáticos

Para testar a sua visão sobre os fenómenos electrostáticos, Faraday apresenta três testes ou questões a que a experiência devia responder:

1. Se a indução electrostática se dava sempre em linha recta ou se também ocorria em linhas curvas;
2. Se a indução electrostática dependia do meio entre os corpos carregados;
3. Se existiria carga absoluta, isto é, se se poderia carregar um corpo sem carregar outro vizinho deste com carga contrária;

Em relação à primeira questão, Faraday escreve: “Se [a indução ocorresse] apenas em linhas rectas, embora não fosse talvez decisivo, isto seria contra o meu ponto de vista; mas se [ocorresse] também em linhas curvas, isso seria um resultado natural da acção de partículas contíguas, mas, penso eu, completamente incompatível com a acção à distância” [E.R., §1166].

Aqui Faraday enganou-se. Com efeito, na mecânica de Newton as linhas força correspondentes à interacção de dois corpos devem ser rectas pois as forças entre dois corpos ocorrem sempre segundo a linha que os une. No entanto, se estivermos a falar da acção de duas ou mais partículas,  $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$ , sobre uma outra,  $B$ , as linhas de força não têm de ser rectas pois, embora a força exercida por cada uma das partículas  $A_i$  sobre a partícula  $B$  tenha a direcção da linha que une as duas partículas, **a força resultante da acção de várias partículas  $A_i$  sobre uma partícula  $B$  é uma soma vectorial da acção de cada par de partículas ( $A_i, B$ ) e portanto não tem de se alinhar sempre na mesma direcção, podendo assim dar origem a linhas de força curvas.**

Faraday não se deu conta disto e achou que tinha refutado a acção à distância quando mostrou que as linhas de força eléctrica eram curvas. Faraday mostrou isto várias vezes experimentalmente, numa das vezes usando fios de seda que se alinham com as linhas de força eléctrica, tal como a limalha se alinha com as linhas de força magnética.

Quanto à segunda questão, Faraday mostrou que a indução eléctrica realmente dependia do meio entre os corpos carregados, mostrando que para atingir a mesma diferença de potencial entre dois corpos carregados era necessário mais carga se os corpos tivessem entre eles certas substâncias do que outras.

Por exemplo, na nota acrescentada ao artigo, datada de Março de 1838, Faraday mostrou que era necessário o dobro da carga para provocar a mesma

diferença de potencial num condensador esférico cheio de resina que no mesmo condensador cheio de ar.

À razão entre a diferença de potencial entre dois corpos carregados separados por um dado dieléctrico e a diferença de potencial entre os mesmos dois corpos quando separados por ar Faraday chamou capacidade indutiva específica do dieléctrico.

Assim, podemos concluir que **Faraday descobriu a capacidade indutiva específica.**

**Com a descoberta da capacidade indutiva específica, Faraday convenceu-se de que a acção indutiva se dava através do meio, propagando-se através deste. No entanto, embora a descoberta refute a concepção newtoniana da indução electrostática,** naquela altura existente – segundo a qual a indução electrostática se deveria apenas à interacção entre as cargas eléctricas dos corpos carregados, não dependendo do meio – **obrigando os newtonianos a rever a sua posição,** na verdade não refuta a hipótese metafísica de a acção indutiva electrostática, ser uma acção à distância. Com efeito, **a capacidade indutiva específica pode ser explicada pela interacção à distância entre as partículas do meio dieléctrico e as partículas dos condutores.**

Finalmente, Faraday tentou por diversos meios induzir carga num corpo sem induzir carga oposta num corpo vizinho, até ficar convencido de que tal não era possível e que, portanto, não existiria carga absoluta.

A este respeito importa notar que, de acordo com Faraday, a carga seria causada unicamente pela polarização do dieléctrico, pelo que, se existisse carga absoluta, isso iria contra as ideias de Faraday.

De notar ainda que, desta forma, Faraday explica adequadamente a razão de a carga eléctrica se conservar, contrariamente ao que acontecia no quadro conceptual em que os newtonianos se situavam, no qual a conservação da carga eléctrica era um postulado.

### 5.5.3 A concepção de Faraday sobre a indução electrostática

Depois de analisar experimentalmente as três questões que referimos, Faraday fez, no final do artigo, um resumo das suas ideias expondo as suas concepções acerca da indução electrostática e da importância desta nos fenómenos electrostáticos.

Aí, Faraday escreve que “a indução parece ser essencialmente uma acção de partículas contíguas, por intermédio das quais a força eléctrica ... é propagada ou mantida à distância” [E.R., §1295]. Mais à frente acrescenta que estas ficam “num certo estado polarizado ... ao qual são levadas pelo corpo electrificado que mantém a acção ... assumindo pontos positivos e negativos, que estão simetricamente dispostos uns em relação aos outros e às superfícies ou partículas indutoras” [E.R., §1298]. Esclarece também que por polaridade entende apenas “uma disposição da força, de forma que, a mesma molécula adquiere poderes opostos em diferentes partes” [E.R., §1304] e que o estado polarizado “só pode ser mantido em isolantes” [E.R., §1298]. Nestas condições, “toda a carga dos condutores está [localizada] na sua superfície, porque sendo essencialmente indutiva, é apenas aí que o meio [isolante], capaz de sustentar o necessário estado indutivo, começa” [E.R., §1301]. Faraday nota ainda que, a seu ver, “a indução ... produz a carga em todos os casos ordinários e provavelmente em qualquer caso; parecendo ser a causa de toda a excitação [eléctrica], e precede qualquer corrente.” [E.R., §1299].

Daqui depreende-se que, para Faraday, a carga eléctrica nos condutores resulta da polarização das moléculas do dieléctrico que estão próximas da superfície destes a quais, irão, depois, polarizar moléculas vizinhas que, por sua vez, irão polarizar outras moléculas vizinhas até se encontrar um condutor que, por não poder sustentar o estado polarizado, terá na sua superfície carga oposta à da superfície indutora.

Deste modo, não existe carga que não seja devida à polarização o que está de acordo com a inexistência de carga absoluta, verificada por Faraday.

Quanto às linhas de força eléctrica, a polarização sucessiva das moléculas dá-se, necessariamente, ao longo destas, uma vez que cada molécula polarizada se alinha ao longo da força eléctrica que sobre esta actua. Portanto, para Faraday, a indução ocorre ao longo destas linhas, sendo a força eléctrica transmitida ao longo das mesmas, de tal forma que, em extremidades opostas, apresenta sentidos opostos.

De notar que, desta forma, toda a interacção entre corpos electrizados se reduz à atracção de corpos opostamente electrizados. Com efeito, se a interacção

electroestática se dá por intermédio das linhas de força e estas saem dos corpos positivamente electrizados para os corpos negativamente electrizados, então apenas corpos opostamente electrizados interactuam uns com os outros. Consequentemente, a repulsão entre dois corpos positivamente electrizados e entre dois corpos negativamente electrizados deve ser explicada pela atracção em direcções opostas dos referidos corpos. Segundo nos diz William Berkson, Faraday escreveu no seu diário uma explicação deste tipo. No entanto, nunca a publicou.

Para explicar a curvatura das linhas de força eléctrica, Faraday considera que “a força indutiva directa ... é acompanhada de uma força lateral ou transversa equivalente a uma dilatação ou repulsão destas linhas” [E.R., §1297].

De facto, se as linhas de força eléctrica são curvas é porque existe, para além da componente da força eléctrica que tem a direcção da recta que une os dois condutores – que Faraday designa por força indutiva directa – uma força, mais precisamente, uma componente da força eléctrica, com direcção transversal à referida recta - que Faraday designa apropriadamente de força lateral ou transversal. Esta última, como veremos, será usada por Faraday para estabelecer uma relação entre a força eléctrica e a força magnética.

Finalmente, quanto à capacidade indutiva específica, Faraday explica esta última notando que o estado polarizado é um estado de tensão, isto é, que necessita de uma certa quantidade de força para se manter. A intensidade de força eléctrica, necessária para manter um certo grau de polarização, varia consoante o dieléctrico. Daí que a quantidade de carga necessária para manter um certa diferença de potencial electroestático dependa do dieléctrico.

#### 5.5.4 Descargas e correntes eléctricas

Depois de expor a suas ideias sobre a indução, Faraday trata do que acontece nas descargas eléctricas e nas correntes eléctricas como um modo particular de descarga, isto é, como o próprio define, de as partículas do dieléctrico regressarem ao seu estado natural apolar.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Ver E.R., 1300



Para isso, Faraday começa (no seu segundo artigo sobre electroestática, a 12ª série das *Experimental Researches*, publicado no princípio de 1838) por distinguir quatro modos de descarga:

- Condução que “não envolve nenhuma acção química, e aparentemente nenhum deslocamento de partículas”;
- Descarga electrolítica (ou electrólise) em que “ocorre acção química e as partículas devem, em certa medida, ser deslocadas”;
- Descarga disruptiva, aquela que se dá “nomeadamente por meio de faíscas” e que envolve um “deslocamento violento das partículas do dieléctrico”;
- Convecção ou descarga por transporte “em que a descarga é efectuada pelo poder de transporte das partículas” [E.R., §1319];

O primeiro modo de descarga que Faraday trata é a condução. Um condutor – diz-nos Faraday – distingue-se de um dieléctrico por, após a excitação eléctrica e a polarização das partículas por indução, as partículas do dieléctrico manterem o estado de polarização e as do condutor não.

Mais precisamente, depois de estarem num estado polarizado, partículas “contíguas”, quer de dieléctricos, quer de condutores, podem, segundo Faraday, “comunicar as suas forças uma à outra” [E.R., §1326]. Isto, para Faraday, constitui a descarga, pois a partícula que comunica as suas forças a outra diminui o seu estado de polarização.

“Todos os corpos parecem descarregar” – acrescenta Faraday – “mas a presença desta capacidade em maior ou menor grau em diferentes corpos faz deles melhores ou piores condutores” [E.R., §1326]

Portanto, para Faraday, um condutor é um meio em que as partículas comunicam o seu estado polarizado umas às outras, não o retendo. Isto é o que Faraday entende por corrente eléctrica. Pelo contrário, um dieléctrico é um meio em que as partículas têm menor capacidade de comunicar o seu estado polarizado a outras, podendo assim mantê-lo.

A diferença entre o condutor e o dieléctrico é, assim, uma diferença no grau de capacidade para descarga; uma diferença de grau e não um poder que os materiais possuem ou não. Tanto mais que os mesmos materiais em diferentes estados físicos podem ser dieléctricos ou condutores.

Quanto aos dois tipos seguintes de descarga, o que acontece, segundo Faraday, é que o dieléctrico, quanto sujeito a uma voltagem superior a um certo valor, deixa de poder sustentar o estado polarizado e começa a libertá-lo: no caso da descarga electrolítica por meio da decomposição electroquímica; no caso da descarga disruptiva por meio de faíscas.

Finalmente, já no artigo seguinte (13ª série das *Experimental Researches*, publicado um mês depois do anterior), Faraday trata o caso das descargas por convecção ou transporte, explicando como, de acordo com a sua concepção da indução, uma partícula, quer de um condutor, quer de um dieléctrico, pode transportar consigo carga. O que acontece é que se uma partícula neutra passa perto de um corpo electrizado fica polarizada por indução e será atraída na direcção desse corpo. Ao entrar em contacto com ele fica com o mesmo tipo de electricidade e é então repelida, levando consigo parte da carga do corpo. Um exemplo disto é o fenómeno bem conhecido da atracção de, por exemplo, pedacinhos de papel por um objecto de plástico previamente electrizado por fricção.

#### 5.5.5 Notas finais acerca da indução electroestática: o quarto artigo sobre electroestática

O quarto artigo de Faraday sobre electroestática (14ª série das *Experimental Researches*, publicado em Dezembro de 1838) constitui o remate final das suas concepções acerca da indução.

Neste artigo, Faraday começa por afirmar que “A teoria da indução proposta nas três séries anteriores ... não assume nada de novo quanto à natureza da força ou forças eléctricas, mas apenas quanto à sua distribuição” [E.R., §1667].

Continuando, podemos ler:

“Os efeitos [da indução] podem depender da associação de um fluido eléctrico com as partículas de matéria, como na teoria de Franklin ... ou podem depender da associação de dois fluidos eléctricos, como na teoria de ... Poisson; ou podem não depender de qualquer coisa a que se possa propriamente chamar fluido eléctrico, mas de vibrações ou outras afecções da matéria na qual surgem. A teoria não é afectada

por tais diferenças no modo de ver a natureza das forças ... embora tenha a pretensão ... [de] expor como os poderes são distribuídos” [E.R., §1667].

Para explicar melhor as suas ideias, Faraday faz uma comparação:

“As partículas do meio dieléctrico quando sob indução podem ser comparadas a séries de pequenas agulhas magnéticas, ou mais correctamente ainda a séries de pequenos condutores isolados. Se o espaço à volta de um condutor carregado fosse preenchido com uma mistura de um dieléctrico isolante ... e pequenos condutores globulares ... isolados; estes últimos ... iriam na sua condição e acção assemelhar-se ao que eu considero ser a condição e acção das partículas do próprio dieléctrico isolante” [E.R., §1679].

Continuando, Faraday explica que, se a esfera estiver carregada os pequenos condutores isolados ficam, em lados opostos, com carga oposta ou forças opostas, ou seja, tornam-se polares. Se, pelo contrário, a esfera for descarregada estes deixam de estar no referido estado polar, regressando à sua costumeira condição apolar.

Faraday explica também que as linhas de força eléctrica, geradas na situação em que o corpo está carregado e tem os condutores à volta, deixariam de ser rectas pois “haveria uma difusão lateral de força” devida à polarização das esferas, uma vez que “cada esfera polarizada estaria em ... relação com todas as contíguas a esta” [E.R., §1679] e, portanto, sobre cada esfera estaria a actuar mais do que uma só carga.

Finalmente, quanto à capacidade de descarga que distingue os condutores dos dieléctricos, Faraday recorda-nos que esta seria resultado da capacidade das partículas polarizadas para transferirem esse estado a partículas vizinhas, deixando as primeiras de estar polarizadas, o que no modelo de esferas condutoras corresponderia às esferas poderem comunicar o seu estado polarizado a outra.

Note-se que, efectivamente, neste modelo encaixam quaisquer concepções sobre a carga, pelo menos as referidas por Faraday, uma vez que todas podem explicar a polarização de um condutor. Há apenas que ter em conta que, de acordo com Faraday, não existe carga absoluta, sendo esta gerada unicamente pela polarização, e que, segundo Faraday, tanto os condutores como os dieléctricos contêm ou podem manifestar carga eléctrica. Não é, portanto, quanto à noção de carga que as concepções de Faraday sobre a indução, expostas nestes quatro artigos, publicados

como quatro séries das *Experimental Researches*, se distinguem necessariamente das concepções defendidas pelos newtonianos<sup>8</sup>.

A diferença essencial está, como o próprio Faraday nota, no modo como se considera que as forças se distribuem. Quanto a isso, Faraday escreve:

“Eu penso que é evidente, que no caso referido, a acção à distância pode apenas resultar de uma acção das partículas contíguas. Não há razão nenhuma pela qual o corpo indutor deva polarizar ou afectar condutores distantes e deixar ... as partículas do dieléctrico inalteradas” [E.R., §1680].

A diferença essencial entre as concepções de Faraday sobre a indução e as dos newtonianos era a seguinte: para Faraday a indução dar-se-ia sempre por meio da polarização de partículas contíguas, não sendo, como na metafísica newtoniana, uma acção à distância, entre partículas distantes, que deixasse inalteradas as partículas intermediárias.

De facto, em concordância com as suas ideias sobre indução electromagnética, Faraday defende aqui que a acção progride gradualmente através do meio, neste caso, do meio dieléctrico e ao longo das linhas de força.

## 5.6 Relação entre a força eléctrica e a força magnética

### 5.6.1 A concepção de Faraday do electromagnetismo

Tendo Faraday relacionado a indução electrostática com a corrente eléctrica e outras formas de descarga eléctrica, Faraday precisava de explicar porque as correntes, e as descargas eléctricas em geral, geram força magnética perpendicular à direcção da corrente ou descarga eléctrica, algo que, recordemos, Ampère não explicara.

No fundo a questão é: qual a relação entre o fenómeno de descarga electrostática e a força magnética?

---

<sup>8</sup> Nestes quatro artigos Faraday foi muito cuidadoso e por isso o modelo que apresenta para a indução permite várias interpretações quanto ao que é a carga. Mais à frente, contudo, veremos que Faraday tem, de facto, uma noção de carga diferente da dos Newtonianos, associada a uma noção de matéria diferente, a qual é indispensável para compreender a teoria de Faraday.

Faraday nota que quando uma corrente ou descarga eléctrica ocorre entre dois corpos, previamente carregados por indução electrostática, as linhas de força electrostática “enfraquecem ... e, à medida que a sua tensão repulsiva lateral diminui, contraem e por fim desaparecem [fundindo-se] na linha de descarga” [E.R., §1659].

Faraday questiona então se a força lateral, isto é, a componente da força eléctrica perpendicular à direcção da linha que une os dois corpos sob indução, poderia corresponder, no momento da descarga, à força magnética. Nas palavras de Faraday: “Não poderia a passagem da electricidade estática a corrente eléctrica, e da tensão eléctrica lateral das linhas de força indutivas [eléctricas] a atracção lateral de linhas de descarga semelhantes [com o mesmo sentido], terem a mesma relação e dependência e decorrerem paralelamente uma à outra?” [E.R., §1659]

De facto, se no momento da descarga a componente transversa da força eléctrica se anula ao mesmo tempo que a força magnética é gerada, não poderão as duas ter relação? Não será isso resultado da transformação da componente transversa da força eléctrica em força magnética?

Assim, Faraday propõe que a força magnética seja a força lateral em que se converte a componente transversa da força electrostática no momento da descarga eléctrica.

Embora estas concepções sejam visualmente atractivas, não foi possível a Faraday estruturá-las em termos matemáticos. Não passaram, assim, de conjecturas. De qualquer forma tiveram consequências que foram importantes para o seu trabalho.

Dado que a indução eléctrica, de acordo com Faraday, é uma acção de partículas contíguas, isto implica que a acção magnética também deveria ser uma acção de partículas contíguas, propagando-se no meio, em vez de actuar à distância.

Neste caso seria natural que não deixasse indiferentes as partículas do meio.

De facto, Faraday defendia que, embora só se observe a acção da força magnética sobre condutores ou ímans isto não significaria que as partículas do meio que os separa não sejam afectadas pela força magnética.

Na verdade, nota Faraday, é até mesmo provável que assim seja, não só porque seria estranho que a acção magnética ao propagar-se deixasse indiferente o meio, mas também porque, “uma e outra vez a relação entre condutores e não-condutores tem-se mostrado ser ... apenas de grau... e, portanto, ... é provável que o que afecta um

condutor afecte um isolante; produzindo talvez o que mereça a designação de estado electrotónico” [E.R., §1661].

Aqui Faraday reintroduz o conceito de estado electrotónico como o estado em que a matéria fica quando actuada pela força magnética.

Uma vez que nos condutores o estado electrotónico leva à geração de correntes, nos dieléctricos, que não devem ser de natureza diferente dos condutores, pelos motivos que Faraday considerou atrás, deveria verificar-se uma tendência para a geração de corrente. **O estado electrotónico seria então uma tendência para a geração de correntes.**

Para testar a existência do referido estado electrotónico, Faraday procurou encontrar para a indução electromagnética o fenómeno equivalente à capacidade indutiva específica na indução electroestática.

Para isso realizou um conjunto de experiências de indução electromagnética em que interpôs, entre a corrente indutora ou íman e a corrente induzida, diversos materiais, nomeadamente materiais com diferentes condutibilidades, e averiguou se a introdução desses materiais provocava alguma alteração na indução electromagnética. Verificou que apenas os materiais ferromagnéticos, isto é, que ficam magnetizados na presença de forças magnéticas reforçando-as, alteravam a corrente induzida, aumentando a sua intensidade.

Apesar deste resultado negativo, Faraday não desistiu das suas ideias. Pelo contrário, manteve a sua ideia de que a força eléctrica lateral, responsável pela curvatura das linhas de força eléctrica, se converte na força magnética das correntes, quando estas se formam e que a força magnética, assim produzida, propaga-se através dos materiais, por acção de partículas contíguas que à sua passagem ficam num estado de tensão que Faraday designou de estado electrotónico e que corresponde a uma tendência para a produção de correntes.

**Desta forma, Faraday relaciona a força eléctrica e a força magnética e considera-as forças que se propagam através do meio, em vez de forças de acção à distância, tentando, assim, produzir uma teoria electromagnética de campo.<sup>9</sup>**

---

<sup>9</sup> Uma teoria de campo é uma teoria em que a acção se propaga.

### 5.6.2 Análise crítica da concepção de Faraday do electromagnetismo

As concepções de Faraday acima expostas permitem explicar:

- A indução electrostática, como uma polarização das partículas do dieléctrico devida à excitação e propagação das forças eléctricas;
- As diferentes descargas eléctricas, incluindo as correntes eléctricas, como uma transferência do estado polarizado de umas moléculas para as outras;
- A força magnética como a força lateral em que se converte a componente transversal da força electrostática no momento da descarga eléctrica;
- A atracção e repulsão de correntes, como a acção da força magnética sobre as mesmas.

Fica, no entanto, por explicar como o estado electrotónico, descrito inicialmente como o estado em que fica a matéria quando sujeita à força magnética, e mais tarde como uma tendência para a geração de correntes, dá origem a correntes ou descargas eléctricas.

Nesta altura estavam também por conceber situações experimentais que evidenciassem/tornassem plausível a existência do referido estado electrotónico.

### 5.7 O electromagnetismo de Faraday e a sua concepção de matéria

Para além das dificuldades acima mencionadas, o electromagnetismo de Faraday, tal como é apresentado nas séries 11<sup>a</sup> a 14<sup>a</sup> das *Experimental Researches*, sem qualquer crítica ao conceito newtoniano de matéria, e até mesmo, sem qualquer crítica ao conceito newtoniano de carga, levantava uma séria questão: de acordo com o conceito newtoniano de matéria, as partículas, mesmo as mais próximas entre si, estão separadas por espaço, pelo que não existem partículas contíguas mas apenas partículas vizinhas, que podem estar tão distantes entre si quanto um material pode ser rarefeito.

Assim, de acordo com o conceito newtoniano de matéria, uma acção de partículas contíguas não tem qualquer sentido. Quanto muito poder-se-ia falar de uma

acção entre partículas vizinhas, mas dado que estas podem estar tão distantes umas das outras quanto se queira, esta acção nunca deixaria de ser uma acção à distância.

Por outro lado, se a acção se pode dar entre partículas tão distantes quanto se queira, então não faz sentido que se dê entre partículas vizinhas e não se dê entre quaisquer partículas.

A ideia de Faraday de uma acção de partículas contíguas em vez de uma acção à distância parece, assim, sofrer uma grave objecção.

Faraday só clarificou as suas ideias muito depois num outro artigo em que defendeu uma noção de matéria que explica a sua ideia de partículas contíguas, nomeadamente, no seu artigo de Janeiro de 1844: “A speculation touching Electric Conduction and the Nature of Matter”.

No referido artigo, Faraday começa por notar que, de acordo com a visão newtoniana de matéria, em que podemos falar “das partículas e do espaço entre estas... como duas coisas distintas” [E.R., Vol.2, pág.286]<sup>10</sup>, um meio material é constituído por partículas e espaço sendo, este último, a “única parte contínua” [Ibidem].

Assim, diz-nos Faraday, de acordo com a referida teoria atómica, se o meio for não-condutor, o espaço deve ser um isolante, pois, se fosse um condutor, o meio, constituído pelas partículas e pelo espaço, “não poderia isolar, qualquer que fosse ... [o] poder condutor dos átomos materiais; [uma vez que] o espaço seria como uma fina rede metálica penetrando o material em todas as direcções” [Ibidem].

No entanto, se o meio for condutor, de acordo com o mesmo ponto de vista, o espaço teria de ser um condutor, caso contrário, as partículas do meio ficariam isoladas umas das outras.

De acordo com este raciocínio, pareceria então “que ao aceitar a teoria atómica ordinária, poderia provar-se que o espaço é um não-condutor em corpos não-condutores, e um condutor em corpos condutores” [E.R., Vol.2, pág.286], o que é obviamente um absurdo. Faraday conclui assim que a concepção newtoniana da matéria deve ser falsa.

---

<sup>10</sup> Esta é a forma abreviada de escrever ” [Faraday, *Experimental Researches in electricity*, Vol.2, pág.286]. A partir de agora todas as citações de páginas das *Experimental Researches in electricity* que não têm numeração de parágrafos serão citadas na forma [E.R., Vol. número do volume, pág. número da página]



Este raciocínio é erróneo porque pressupõe que o espaço deve ser um condutor ou um não condutor. No entanto, para os newtonianos apenas a matéria pode ser condutora ou não condutora pois o que determina se um material é condutor, ou não, é a interacção à distância entre os fluidos eléctricos e as partículas do material. O espaço, sendo desprovido de partículas não é condutor nem isolante e, admitindo que existe acção à distância, não tem qualquer papel na determinação da condutibilidade de um material.

Apesar do raciocínio de Faraday estar errado, o facto de este ter pensado que tinha encontrado um argumento contra a concepção newtoniana da matéria, levou-o a atrever-se a propor a sua própria concepção de matéria.

Faraday diz reconhecer que os diversos ramos de conhecimento parecem apontar para a existência de centros de forças – as partículas ou átomos de matéria – mas que tem dificuldade em conceber a existência de átomos de matéria separados uns dos outros e que lhe parece que essa visão leva a conclusões contraditórias.

Diz também que lhe parece que devemos fazer o mínimo de hipóteses possível. Nesse sentido, continua Faraday, “os átomos de Boscovich parecem ter grande vantagem sobre a concepção actual” [E.R., Vol.2, pág. 290], ou seja, sobre a concepção newtoniana dos átomos.

Explicando, então, a sua concepção das ideias de Boscovich, Faraday diz-nos que os átomos de Boscovich, “são meros centros de forças ou poderes, não partículas de matéria, em que os ditos poderes residem” [Ibidem]. Por outras palavras, a matéria seria constituída por forças, não sendo as partículas mais que centros de forças a partir dos quais estas divergem ou nos quais convergem.

A favor do seu ponto de vista, Faraday argumenta que “toda a nossa percepção e conhecimento do átomo, e mesmo a nossa fantasia, se limita às ideias acerca dos seus poderes” [Ibidem], pelo que se levanta a questão: qual é a base para imaginar um átomo sólido independente das forças conhecidas?

Por outro lado, Faraday diz-nos que entre o átomo e as forças ou poderes a este associadas consegue conceber “uma diferença em grau ou até na natureza do poder consistente com a lei da continuidade ... mas eu não posso imaginar a diferença entre uma suposta partícula rígida e pequena e os poderes à volta dela” [E.R., Vol.2, pág. 290].

Depois destes argumentos, Faraday analisa as consequências da sua concepção da matéria, em comparação com a dos newtonianos.

Faraday nota, então, que, na concepção proposta por si, não sendo o átomo de natureza diferente das forças a este associadas, que nesta perspectiva o constituem, “a matéria atómica está presente em todo o lado, e não existe espaço não ocupado por esta”. Assim, “a matéria será contínua... [e] não se terá de supor a distinção entre os átomos e qualquer espaço interveniente” [E.R., Vol.2, pág. 291]. Desta forma, diz-nos Faraday, não surge o problema da condutibilidade do espaço.

Outra vantagem, referida por Faraday, consiste em que, nesta concepção da matéria, os átomos são mutuamente penetráveis, pois as forças podem sobrepor-se, o que, note-se, permite explicar a formação das moléculas como a fusão de dois átomos, as suas forças e centros de força sobrepondo-se.

A concepção de Faraday sobre a matéria, tem ainda a vantagem de:

- a) explicar o que são partículas contíguas;
- b) explicar como uma partícula e não apenas uma molécula pode estar num estado polarizado (sem recorrer à concepção newtoniana de carga e de partículas ou pontos materiais electricamente carregados);
- c) permitir uma concepção de espaço diferente da newtoniana.

Com efeito, uma vez que nesta concepção da matéria os átomos não são impenetráveis, mas antes se estendem, como Faraday diz, “por todo o sistema solar [ou universo], ainda que mantendo o seu próprio centro de força” [E.R., Vol.2, pág.293], estes não ocupam espaço, no sentido newtoniano da expressão “ocupar espaço”<sup>11</sup>, mas antes estendem-se e interactuam uns com os outros, de tal forma que não existe um espaço independente da matéria ou força. Podemos, pois, dizer que o espaço para Faraday é a extensão da matéria ou força, a qual é, a seu ver, a única substância do universo.

Quanto ao estado polarizado, Faraday explica que este corresponde a uma disposição assimétrica das forças em torno do centro de força, ao passo que a

---

<sup>11</sup> Recorde-se que para Newton “ocupar espaço” significa a impossibilidade de dois pontos materiais ocuparem simultaneamente o mesmo espaço, logo se Faraday nega esta impossibilidade nega a noção newtoniana de ocupação de espaço.

disposição mais ou menos simétrica das forças indica um estado mais ou menos apolar.

Assim, Faraday demarca-se claramente da posição newtoniana quanto à carga. Enquanto nas séries das *Experimental Researches*, Faraday deixa margem para uma interpretação da polarização como uma distribuição assimétrica de partículas newtonianas carregadas, aqui Faraday acaba com essa ambiguidade definindo que a polaridade resulta de uma assimetria na distribuição de forças em torno do centro de forças da partícula polarizada.

Finalmente, fica claro que partículas contíguas são partículas vizinhas, que de acordo com este ponto de vista de Faraday sobre a matéria, são efectivamente contíguas, as forças de uma tocando as da outra.

De notar que só nesta perspectiva o electromagnetismo de Faraday fica livre das objecções expostas no início desta secção. Uma vez que esta perspectiva implica uma noção de estado polarizado e de carga diferente da newtoniana conclui-se que, ao contrário da ideia que Faraday tentou passar nas *Experimental Researches*, o electromagnetismo de Faraday não admite as noções newtonianas de carga que Faraday dizia aí admitir, nem é verdade que a forma como a força se distribui seja independente da noção de carga que se considera.

Na verdade, o electromagnetismo de Faraday não é separável da sua concepção da matéria como força e da carga como o resultado de uma distribuição polar das forças eléctricas.

## 5.8 O diamagnetismo e o paramagnetismo em Faraday

### 5.8.1 Descoberta da rotação magnética do plano de polarização da luz

Dois anos depois da publicação do seu artigo sobre a natureza da matéria, Faraday publicou uma nova descoberta de importância reconhecida.

Ao colocar um vidro rombóide, com elevado índice de refração, entre os pólos de um forte electroíman, e ao fazer passar por ele um raio de luz polarizada

linearmente por reflexão, de modo que o raio de luz passasse paralelamente às linhas de força magnética, Faraday descobriu que o plano de polarização da luz era rodado.

O mesmo acontecia se no lugar do vidro rombóide se colocassem outros materiais diamagnéticos<sup>12</sup> que até aí se desconhecia terem alguma propriedade magnética. No entanto, o ar e outros materiais não apresentavam tal fenómeno.

Se em vez de a luz passar paralelamente às linhas de força passasse segundo uma diagonal a estas, a amplitude do ângulo de rotação seria proporcional à componente da direcção do raio paralela às linhas de força, não havendo rotação se o raio de luz fosse perpendicular às linhas de força.

Se a força magnética fosse gerado por corrente eléctrica acontecia o mesmo.

Faraday verificou ainda que a amplitude do ângulo de rotação seria proporcional à intensidade das linhas de força magnéticas, sendo diferente para diferentes materiais.

No momento em que o material deixava de estar sob acção da força magnética, mesmo que tivesse estado antes, o efeito desaparecia.

Esta foi uma das primeiras descobertas da interacção entre o campo electromagnético e a luz. Faraday encarou-a como uma grande contribuição “para os factos e considerações que tendem a provar que todas as forças naturais estão interligadas, e têm uma origem comum” [E.R., §2221], uma referência clara à ideia de que a força se conserva nunca sendo criada ou destruída mas apenas transformada, uma ideia que, como constatamos, Faraday defendeu.

Faraday também notou que, uma vez que o fenómeno só se dá se a luz atravessar certos materiais, e dá-se em diferentes graus para diferentes materiais, podemos concluir que “o magnetismo e a luz actuam um sobre o outro através da intervenção da matéria” [E.R., §2224].

Por outro lado, se a intervenção da matéria é necessária e se esta influencia o efeito final, e uma vez que tal influência só se dá se a matéria estiver sob acção da força magnética, conclui-se que as forças magnéticas “afectam a constituição interna do [material] diamagnético” [E.R., §2226] deixando-os numa “nova condição

---

<sup>12</sup> Por diamagnético Faraday designa, nesta série, “um corpo que é atravessado por linhas de força magnética e que não assume, por acção destas, o habitual estado magnético do ferro” [E.R., 2149], por outras palavras um material não-ferromagnético, isto é, que não fica magnetizado quando inserido num campo magnético.

magnética... [a qual] é um estado de tensão” [E.R., §2227], isto é, um estado que só se mantém enquanto a força, neste caso, a força magnética que actua sobre a matéria em questão se mantém.

Em relação a este estado, Faraday considera que seria obtido sempre que se sujeitasse o material à acção da força magnética, independentemente de se fazer ou não passar luz polarizada pelo material, sendo a rotação do plano de polarização da luz uma consequência de a matéria estar no referido estado, constituindo uma forma de evidenciar este estado.

Além disso, Faraday considera que outros materiais não-ferromagnéticos, nos quais não se observa ou não se pode observar a rotação do plano de polarização da luz – por exemplo, por serem opacos – quando sob acção da força magnética, podem estar na mesma condição magnética que os outros e não se detectar neles a rotação do plano de polarização da luz por motivos alheios a estarem ou não no referido estado.

Faraday nota ainda que o referido estado de tensão é, possivelmente, uma tendência para a geração de correntes, pois se os materiais ferromagnéticos, quando sujeitos à força magnética, ficam magnetizados e, de acordo com Ampère, isso significa que neles se geram correntes, é natural pensar que nos outros materiais surja uma tendência para a geração de correntes.

Recordando que Faraday chamou estado electrotónico ao estado em que seria deixada a matéria quando sofria a acção da força magnética, percebemos que encontrou aqui um forte argumento empírico de que tal estado existe, pelo menos em certos materiais.

Finalmente, vale a pena notar que Faraday considerou esta descoberta como favorável à sua concepção de matéria. Com efeito, Faraday escreve:

“Reconhecendo ou percebendo a matéria apenas pelos seus poderes, e não sabendo nada [acerca] de qualquer núcleo [ponto material] imaginário, abstraído da ideia desses poderes, o fenómeno descrito neste artigo reforça grandemente a minha inclinação para confiar no ponto de vista que propus numa ocasião anterior acerca da sua natureza”.

### 5.8.2 Descoberta do diamagnetismo e paramagnetismo

Pouco depois da descoberta da rotação magnética do plano de polarização da luz, prosseguindo o estudo das propriedades magnéticas dos materiais não-ferromagnéticos, Faraday resolveu verificar o que acontecia se suspendesse, entre os pólos de um forte electroíman, diversos destes materiais, nomeadamente o vidro rombóide e os restantes materiais que rodavam o plano de polarização da luz. Descobriu, então, que uma porção destes materiais, com forma alongada (como uma barra ou fatia), inicialmente suspensa obliquamente às linhas de força magnética, rodava, tendendo a ficar perpendicular a estas últimas, da mesma forma que uma agulha magnética roda, tendendo, no entanto, a ficar paralela às linhas de força.

Fazendo o teste com vários materiais, Faraday verificou que a maioria dos materiais não-ferromagnéticos se alinhava perpendicularmente às linhas de força, ao passo que uns poucos metais se comportavam como os materiais ferromagnéticos, alinhando-se paralelamente às linhas de força.

Faraday dividiu, então, os materiais em duas classes, consoante a sua reposta à força magnética: aos materiais que tendem a colocarem-se perpendicularmente às linhas de força chamou diamagnéticos, aos restantes, que tendem a colocar-se paralelamente às linhas de força, chamou magnéticos. Mais tarde, para distinguir os ferromagnéticos, isto é, os que depois de magnetizados se tornam ímanes permanentes, dos restantes materiais magnéticos, que embora sendo magnéticos não formam ímanes permanentes, Faraday chamou a estes últimos paramagnéticos.

Noutro teste, Faraday colocou os materiais perto de um só pólo magnético de elevada intensidade. Faraday verificou que os materiais diamagnéticos eram repelidos pelo pólo magnético, independentemente de este ter polaridade norte ou sul, ao passo que os magnéticos, desde que não previamente magnetizados, eram atraídos.

Mais genericamente, Faraday verificou que, quando sob a acção da força magnética, os materiais diamagnéticos se deslocavam para zonas de menor intensidade dessas forças, ao passo que os materiais magnéticos (inicialmente não magnetizados) se deslocavam para zonas de maior intensidade.

### 5.8.3 Conjecturas propostas

Para explicar o fenómeno do movimento dos materiais diamagnéticos, sob acção da força magnética, Faraday nota, em primeiro lugar, que o fenómeno pode ser explicado supondo que, sob acção das forças magnéticas, seriam induzidas, em torno de cada partícula diamagnética, correntes com sentido oposto às supostamente induzidas nos materiais magnéticos. Isto faria com que nos materiais diamagnéticos, ao contrário do que acontece nos materiais magnéticos, fossem induzidos pólos magnéticos iguais ao pólo magnético mais próximo, o que causaria o efeito de repulsão e, conseqüentemente, a tendência para se moverem para zonas de intensidade magnética mais baixa.

Esta conjectura tem como possível objecção o facto de as correntes induzidas por indução electromagnética terem sempre sentido oposto às correntes que geram a força magnética. Assim, fica-se sem perceber como podem surgir nos materiais diamagnéticos correntes opostas às que surgem nos materiais magnéticos, e que, conseqüentemente, têm o mesmo sentido das correntes que geram a força magnética. Além disso muitos dos materiais diamagnéticos são não-condutores.

Em resposta a esta possível objecção, Faraday diz-nos que esta conjectura não estaria em contradição com a indução electromagnética, nem com a não-condutibilidade dos materiais diamagnéticos, na medida em que, no caso da magnetização, as correntes eléctricas induzidas ocorrem à escala molecular e não através do condutor como na indução electromagnética.

Mais tarde (em 1850) Faraday avançou com outro conceito: o da condutibilidade magnética. As propriedades magnéticas ou diamagnéticas dos materiais seriam devidas à diferente condutibilidade magnética dos mesmos, isto é, à diferente “capacidade que os corpos podem ter para efectuar a transmissão da força magnética” [E.R., §2797]. Os materiais magnéticos seriam os bons condutores, ou seja, aqueles que “facilitam a transmissão deste poder [a força magnética] ” [E.R., §2802], ao passo que os materiais diamagnéticos seriam aqueles que resistem à transmissão da força.

Tendo baixa condutibilidade magnética, os materiais diamagnéticos ofereceriam resistência à propagação da força e conseqüentemente tenderiam a

deslocar-se para onde houvesse menos força a tentar atravessá-los, o que corresponde a zonas de menor densidade das linhas de força magnéticas e, portanto, de menor intensidade magnética. Pelo contrário, os materiais magnéticos tenderiam a deslocar-se para onde houvesse maior densidade de linhas de força magnéticas, portanto, para zonas de maior intensidade magnética.

Faraday mostra também que os materiais magnéticos causam a convergência das linhas de força no seu interior, ao passo que os materiais diamagnéticos causam a sua divergência, como se pode ver na figura seguinte.

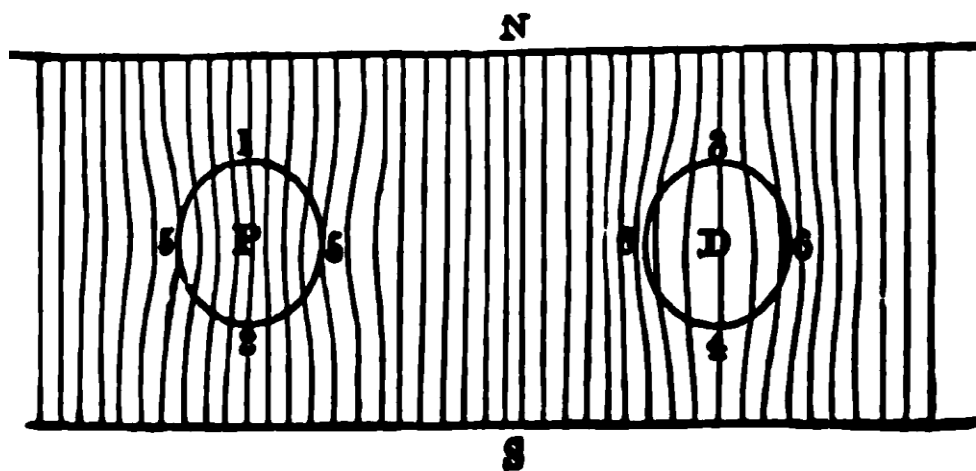


Figura 5 - Linhas de força magnética num material diamagnético e num material paramagnético: P é um material paramagnético, D um material diamagnético e N e S respectivamente os pólos norte e sul de um íman.

A figura mostra também que o efeito que um material diamagnético tem sobre as linhas de força magnética não é o mesmo que tem um material magnético com a polaridade invertida. Pois o material magnético com polaridade invertida causaria a convergência das linhas de força magnética e não a sua divergência.

Assim, a ideia de que um material diamagnético se comportaria como um material magnético com polaridade inversa da induzida nos materiais magnéticos, ideia que segue naturalmente da primeira proposta de Faraday, fica, no mínimo, em dificuldades.

Esta segunda proposta tinha também a vantagem de explicar, entre outras coisas, o comportamento de certos cristais, que, em função da sua orientação, umas vezes se comportam como materiais magnéticos e outras como materiais diamagnéticos. Para isso, bastava supor que estes “conduziam... com mais facilidade



numa direcção que noutras” [E.R., §2837] e que essa direcção seria o que se chama de eixo de fácil magnetização.

Finalmente, vale a pena notar que esta proposta tem ainda a vantagem de estar em harmonia com as ideias de Faraday sobre a relação entre a força magnética e a força eléctrica, nomeadamente com a sua ideia de que a força magnética está relacionada com a variação da força eléctrica transversal (responsável pela curvatura das linhas de força eléctrica). De acordo com esta ideia, a fraca condutibilidade das linhas de força magnética, associada ao comportamento diamagnético, pode ser considerada como uma resistência que estes materiais oferecem à variação da força eléctrica transversal.

## 5.9 Conclusão das *Experimental Researches*

Depois da investigação sobre os fenómenos diamagnéticos e paramagnéticos, Faraday, em 1851, achou que chegara a altura em que “a ideia transmitida pela expressão [linhas de força magnética] deve ser exposta muito claramente, e deve também ser cuidadosamente examinada, de modo a que se possa determinar até que ponto pode ser aplicada ... na representação dos estados magnéticos e dos fenómenos” [E.R., §3070].

Para cumprir este propósito, Faraday começa por definir linha de força magnética como a linha descrita por uma agulha magnética, quando esta é movida de tal forma que a direcção da agulha é sempre tangente à linha em que se move. É, também, acrescenta Faraday, a linha ao longo da qual a deslocação de um fio condutor, colocado perpendicularmente a esta, não induz nenhuma corrente nesse condutor, mas, ao mover-se o condutor noutra qualquer direcção, que não pertença ao plano definido pela linha de força e pelo fio condutor, é induzida corrente nele.

Faraday nota ainda que as linhas de força representam uma quantidade invariante de força, pois – como explica – embora as linhas de força possam variar bastante em direcção, “a força contida em qualquer secção de um dado conjunto das linhas é exactamente igual à soma da força em qualquer outra secção das mesmas, independentemente do quanto a sua forma seja alterada, ou do quão divergentes ou

convergentes possam estar noutro lugar” [E.R., §3073], ou seja, em linguagem moderna, o fluxo da força magnética sobre qualquer secção de um dado conjunto de linhas de força é sempre o mesmo, independentemente dessas mesmas linhas de força convergirem ou divergirem

Tendo isto assente, Faraday trata de argumentar a superioridade do método de representação da força magnética por linhas de força, em comparação com a representação, apenas, da força magnética aplicada nos corpos.

Esta última representação – argumenta Faraday – não permite representar uma acção que se propaga, ao passo que a representação por linhas de força o permite, sendo, portanto, mais versátil.

De seguida, Faraday realça que as linhas de força magnética podem ser experimentalmente detectadas, não só usando uma agulha magnética, mas também avaliando a corrente induzida num condutor em movimento através destas. Este último método – argumenta Faraday – tem vantagens, pois pode, por exemplo, ser usado para avaliar forças magnéticas em zonas onde uma agulha magnética não pode ser usada, tal como no interior de um sólido, ou quando é fortemente afectada pelo meio. Neste último caso, sendo um condutor menos afectado, o método proposto é mais eficiente.

Finalmente, Faraday passa ao desenvolvimento do método de avaliação da força magnética pelas correntes induzidas, e é neste contexto que Faraday faz a investigação que o conduziu à famosa lei de Faraday, mostrando experimentalmente, que “a quantidade de electricidade lançada na corrente é directamente proporcional à quantidade de curvas interceptadas” [E.R., §3115].<sup>13</sup>

A série em que Faraday chega a esta lei – e desenvolve e aplica o método de avaliação da força magnética a partir da corrente induzida num condutor – é a última série das *Experimental Researches*.

---

<sup>13</sup> Note-se que Faraday não diz que a intensidade da corrente induzida é proporcional ao número de linhas de força interceptadas. Em vez falar em intensidade de corrente induzida, Faraday fala em quantidade de electricidade lançada na corrente. A quantidade de electricidade – ou, modernamente falando, de carga – lançada na corrente *por unidade de tempo* é igual à intensidade da corrente induzida. Assim, **a intensidade de corrente induzida é proporcional ao número de linhas de força interceptadas por unidade de tempo.**

### 5.10 A opinião de Faraday acerca das linhas de força

Ao longo das *Experimental Researches*, Faraday teve sempre o cuidado de deixar em aberto a possibilidade de diversas interpretações quanto à natureza das linhas de força, em particular a possibilidade de uma interpretação newtoniana das mesmas. No entanto, como o próprio esclarece, Faraday tinha em mente uma visão particular das mesmas, diferente da newtoniana e compatível com a sua noção de uma acção que se propaga.

Com efeito, na série das *Experimental Researches* acima referida, em que Faraday definiu mais rigorosamente o seu conceito de linhas de força magnética, Faraday notou que anteriormente usou o termo linhas de força tão vagamente que não ficou esclarecido “se eu o considero como uma mera ideia representativa das forças, ou como a descrição do caminho ao longo do qual as forças são continuamente exercidas”. A esse respeito Faraday esclarece: “onde a expressão linhas de força é considerada simplesmente como representação da disposição de forças, tem plenamente esse significado; mas onde esta possa parecer representar o *modo físico* de transmissão da força exprime ... a opinião para a qual me inclino presentemente” [E.R., §3175].

Em defesa desta sua opinião acerca das linhas de força magnética, Faraday escreveu um artigo intitulado “On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force” que publicou na *Philosophical Magazine*, a mesma revista onde publicou o seu artigo sobre a natureza da matéria. Escreveu também um outro artigo intitulado “On the physical lines of magnetic force”, que publicou nos *Proceedings of the Royal Institution*.

Além disso, esta sua opinião está na base da sua visão da natureza da matéria, que Faraday expôs no já referido artigo “A speculation touching Electric Conduction and the Nature of Matter” e também da sua análise acerca da natureza da luz, feita num artigo intitulado “Thoughts on ray vibrations”, que Faraday publicou na mesma revista e no qual defendeu que a luz seria constituída por vibrações transversais das linhas de força, o que implicaria a existência física destas.

Em todos estes artigos, Faraday considerou que se dedicava a “especulações” que, contudo, considerou poderem ter utilidade.

Vejamos, então, que “especulações” são essas e qual é a dita “opinião” de Faraday em relação às linhas de força.

Logo no esclarecimento acima referido, feito ainda no contexto das *Experimental Researches*, podemos notar que Faraday considerou que as linhas de força descrevem “[o] caminho ao longo do qual as forças são continuamente exercidas” e representam “o modo de transmissão da força”.

A ideia de que as linhas de força descrevem o caminho ao longo do qual a força é continuamente exercida, dá-nos uma primeira noção das linhas de força como sendo aquelas ao longo das quais a força continuamente se distribui.

Já a ideia de que representam o modo de transmissão da força remete-nos para a noção de que a força se propaga e conseqüentemente que as linhas de força se propagam.

Com efeito, se a força está distribuída ao longo das linhas de força e se propaga, é evidente que as linhas de força também se propagam e, desta forma, a sua propagação representa a própria propagação da força, ou seja, o modo segundo o qual, na opinião de Faraday, a força se transmite.

Isto está de acordo com o que Faraday nos diz, no seu artigo sobre a natureza da luz, quando refere, acerca da força eléctrica e das linhas de força eléctrica, que “quando há partículas de matéria intervenientes (sendo estas mesmas apenas centros de força), estas tomam parte no transporte da força através da linha, mas, quando não há nenhuma [partícula/centro de força], a linha prossegue através do espaço” [E.R., Vol. 3, pág. 450].

Está também de acordo com o que Faraday escreveu na segunda série das *Experimental Researches*, onde apresentou a sua interpretação da indução electromagnética em termos de linhas de força. Aí podemos ler que as linhas de força magnética se dilatam, pretendendo indicar, como vimos logo de seguida, que essa dilatação seria responsável pela propagação da força.

Vemos, assim, que, para Faraday, as linhas de força se propagam, expandindo-se no espaço, e que essa expansão corresponde à propagação da força.

Juntando os dois aspectos da opinião de Faraday que acabamos de analisar, podemos, concluir que, a seu ver, as linhas de força são as linhas ao longo das quais a

força continuamente se distribui e cuja propagação corresponde à real propagação da força.

É de notar também que, uma vez que Faraday considera que as partículas são centros de força, sendo as linhas de força as linhas ao longo das quais esta mesma força se distribui, pode dizer-se que, para Faraday, as partículas são pontos de convergência das linhas de força.

### 5.11 O artigo “On the Physical Character of the lines of Magnetic force”

A principal dificuldade da noção de Faraday de linhas de força é que esta implica um conceito de força totalmente diferente do newtoniano.

Com efeito, se a força é exercida continuamente ao longo das linhas de força, não existe apenas aplicada a partículas discretamente distribuídas, como afirmam os newtonianos, mas sim continuamente distribuída no espaço, constituindo, como Faraday defendeu nos seus artigos sobre a natureza da matéria e da luz, as próprias partículas e até o meio de propagação da luz.

Para fazer valer a sua opinião Faraday tinha, portanto, de explicar que força é essa que existe continuamente distribuída no espaço e depois justificar que esta, de facto, existe e se propaga no espaço.

No entanto, Faraday nunca disse o que seria essa força que, a seu ver, existe continuamente no espaço.

O que Faraday fez foi dar argumentos em defesa da existência física das linhas de força magnética, no meio ou espaço entre as partículas de matéria ponderável, e indicar formas possíveis desta existência.

Foi isto que Faraday fez, nos dois artigos em que defende a realidade física das linhas de força magnética, nomeadamente nos seus artigos: “On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force” e “On the Physical Lines of Magnetic Force”.

Analisemos, então, o primeiro destes artigos, já que o segundo corresponde ao envio e publicação das mesmas ideias na Royal Institution.

No referido artigo, Faraday começou por indicar que ia fazer “algumas especulações sobre o carácter físico das linhas de força, e da maneira como estas

podem ser consideradas como contínuas no espaço” [E.R., §3243] e defendeu o valor de tais especulações afirmando:

“Não é de supor, em momento algum, que especulações deste tipo sejam inúteis ... Estas devem ser consideradas como duvidosas, e passíveis de erro e mudança; mas são maravilhosas ajudas nas mãos do experimentalista e matemático. Pois não só são úteis em tornar uma ideia vaga mais clara ... dando-lhe algo como uma forma definitiva, que pode ser submetida à experimentação e ao cálculo; mas [também] levam, pela dedução e correcção, à descoberta de novos fenómenos, e portanto causam um aumento e avanço da verdade física” [E.R., §3244].

Faraday argumentou também, em favor das especulações que pretendia fazer, que nem sempre o filósofo se deve contentar com o mero facto da acção à distância, havendo numerosas circunstâncias em que isso é insuficiente e em que o filósofo dirige a sua atenção “para a maneira pela qual a força é transmitida através do espaço” [E.R., §3245].

Foi isso que Faraday fez em seguida, procurando avaliar até que ponto a força magnética é uma acção à distância e até que ponto poderia “compartilhar da natureza de outras forças, cujas linhas [de força] dependem, para a comunicação de força, de agentes físicos intermediários” [E.R., §3245].

Com esse objectivo Faraday começa por comparar a força magnética às outras forças, em particular à força gravítica, que toma como exemplo de uma acção à distância, e com a radiação que é, claramente, uma acção que se propaga.

Faraday notou que não fora descoberta nenhuma afectação qualitativa das linhas de força magnética, análoga à polarização dos raios de luz. Também não havia evidência empírica de que a força magnética levasse algum tempo para actuar sobre corpos distantes. No entanto, Faraday argumentou que se fosse possível provar que as linhas de força eram curvas, ficaria provada a sua realidade física.

Esta afirmação, aparentemente pouco fundamentada, deve-se à convicção de Faraday de que numa acção à distância não é possível conceber linhas de força curvas, e relaciona-se com a necessidade de Faraday de evidenciar que a acção se daria por contiguidade e não à distância. A forma rectilínea das linhas de força poderia permitir que essa interacção fosse instantânea à distância, assumindo implicitamente que as linhas de força seriam meras construções geométricas a que não corresponderia

nenhuma realidade física. Pelo contrário, a curvatura de uma linha de força implicaria, segundo ele, a existência de uma acção por contiguidade, o que, por sua vez, implicaria a atribuição de propriedades físicas reais ao espaço intermédio entre os centros de força.

Este último argumento já tinha sido usado no caso das forças eléctricas e está errado na medida em que, quando um corpo é sujeito à acção de vários corpos, a força resultante sobre este não tem de ter a direcção de nenhum dos corpos actuates e pode variar consoante a posição do corpo, gerando assim linhas de força curvas. No caso das linhas de força em torno de um íman a situação é, contudo, diferente. Neste caso, as linhas de força resultam da acção de um único corpo: o íman. A curvatura destas não se deve, portanto, à acção conjunta de vários corpos. A curvatura das linhas de força magnética deve-se como sabemos à inexistência de pólos magnéticos isolados.<sup>14</sup>

Foi precisamente com base na inexistência de pólos magnéticos isolados que Faraday construiu o seu argumento acerca da realidade física das linhas de força magnética. Com efeito, no referido artigo, Faraday notou que um íman no vácuo deve ter os seus pólos ligados por linhas de força curvas pois, caso contrário, não haveria relação entre estes, e não se explicaria a inseparabilidade dos pólos. No entender de Faraday, algo de físico teria de ser responsável pela inseparabilidade dos pólos e esse algo seriam as linhas de força magnética.

Faraday ponderou então que tipo de existência poderiam ter as linhas de força magnética e notou que “se existem, não é por uma sucessão de partículas, como no caso da indução electrostática..., mas pela condição do espaço livre de tais partículas materiais” [E.R., §3258].<sup>15</sup>

Aqui Faraday descreveu as linhas de força magnética como uma condição do espaço vazio de partículas materiais. De seguida tentou indicar que condição seria essa. Faraday diz:

---

<sup>14</sup> A inexistência de pólos magnéticos isolados diferencia a acção magnética da acção gravítica e da acção eléctrica, e afasta-a do quadro metafísico newtoniano. Embora possa ser descrita pela atracção e repulsão dos pólos magnéticos, uma vez que cada corpo magnético tem sempre dois pólos, a interacção entre dois corpos magnéticos nunca é central como exige a metafísica newtoniana.

<sup>15</sup> Recorde-se que Faraday tinha descrito a acção eléctrica como resultado da polarização sucessiva das partículas do dieléctrico. Daí Faraday falar numa sucessão de partículas, a qual seria indispensável na propagação da força eléctrica.

“ [As linhas de força magnética] podem ser uma vibração de um hipotético éter, ou um estado tensão desse éter ... ou podem ser algum outro estado, que embora difícil de conceber, possa ser igualmente distinto da suposta não existência da linha de força gravítica e da existência separada e independente da linha de força radiante” [E.R., §3263].

Faraday sugeriu também que as linhas de força poderiam ser constituídas pelo estado electrotónico, que, recorde-se, seria um estado de tensão, no sentido em que só se mantém sob a acção da força magnética.

A favor da existência deste estado, Faraday argumentou que se num condutor em movimento surge uma corrente induzida, “esta corrente... dificilmente pode ser concebida como tendo a sua única causa no mero ... movimento... Deve, penso eu, haver um estado prévio, um estado de tensão ... que, quando o movimento é adicionado produz ... corrente eléctrica” [E.R., §3270]<sup>16</sup>.

Nas palavras de Faraday, caso a existência do estado electrotónico fosse admitida, “identificar-se-ia com o que ... constituiria as linhas de força magnética físicas”, isto é, que, por via disso, possuiriam realidade física. [E.R., §3269].

Visto que as linhas de força magnética existem no espaço vazio, e que o estado electrotónico é um estado de tensão, com esta afirmação, Faraday admitiu implicitamente que existiria um estado de tensão no espaço vazio, ou seja, que, por acção da força magnética, o espaço vazio ficaria num estado alterado.

Mais uma vez surge o problema anterior de saber qual o estado do espaço quando neste existe uma linha de força física. Faraday não respondeu a esta questão, limitando-se a questionar se não seria um estado de tensão do éter.<sup>17</sup> Isto implicava, evidentemente, uma cedência aos newtonianos que defendiam a existência de um éter mecânico, ou seja, ao qual se poderiam aplicar as leis de Newton.

Em conclusão, Faraday procurou defender a existência física das linhas de força, como linhas ao longo das quais a força se distribui continuamente e cuja propagação corresponde à propagação da força. Contudo, Faraday não soube dizer que tipo de força podia ter uma tal existência. Ocorreu-lhe então recorrer à ideia de éter e de

---

<sup>16</sup> Mais uma vez recorde-se que aqui tensão significa um estado em que a matéria fica quando sujeita a uma força. Não se trata de tensão no sentido newtoniano do termo.

<sup>17</sup> Faraday escreveu: “o que possa ser esse meio magnético ... desprovido de qualquer substância material, eu não o posso dizer, talvez [seja] o éter” [E.R., §3277]



estados de tensão do éter, o que seria pelo menos familiar aos seus colegas em Cambridge que defendiam a existência de um éter mecânico. Isto correspondeu a um afastamento da sua metafísica, levando a um compromisso com uma metafísica bem diferente.

Por outro lado, Faraday não tinha argumentos convincentes, a favor da existência de forças que se propagam, pois havia sempre uma explicação por acção à distância dos fenómenos que ele considerava refutarem a acção à distância.

A única excepção era a interacção entre a luz e o magnetismo, isto é, como dissemos atrás, a rotação do plano de polarização da luz quando esta atravessa matéria refringente (matéria que se deixa atravessar pela luz) sob a acção de um campo magnético. Partindo do princípio que a luz se propaga num meio, para que esse efeito se produza tem de haver interacção entre a força magnética e o meio em que a luz se propaga, o que torna natural a ideia de que a força magnética se propague nesse meio.

Curiosamente Faraday não faz referência a este argumento, deixando para a posteridade uma conjectura que não tem argumentos suficientes a suportá-la.

Só mais tarde com a verificação experimental da existência de ondas electromagnéticas se deu base experimental às concepções de Faraday. Mas nessa altura, como veremos, as teorias de campo propostas já se tinham afastado bastante das ideias originais de Faraday, tendo sido sobrepostas com a metafísica newtoniana.

## 5.12 Resumo das concepções de Faraday sobre o electromagnetismo

Ao longo da sua investigação, Faraday desenvolveu uma concepção do electromagnetismo partindo de uma metafísica à margem da metafísica newtoniana.

Faraday considerava que tudo o que existia era a força, continuamente distribuída no espaço, sendo as partículas meros centros de força e podendo o próprio espaço ser visto como mera extensão da força. De facto, Faraday nunca disse que este teria uma existência à parte da matéria e nunca fez referência a qualquer movimento absoluto.

Para ilustrar a força, Faraday usou, tal como os newtonianos, linhas de força. Estas eram suficientemente ambíguas para ilustrarem tanto a força no sentido newtoniano, como a força continuamente distribuída que estava na mente de Faraday.

Partindo destas linhas de força, Faraday construiu a sua visão do electromagnetismo. Segundo esta, a carga eléctrica seria resultado da polarização das partículas, sendo este estado, por sua vez, resultado de uma assimetria na distribuição das forças eléctricas em torno do centro de forças da partícula polarizada.

As diferentes descargas eléctricas, incluindo as correntes eléctricas, seriam uma transferência do estado polarizado de umas moléculas para as outras.

No momento em que ocorre uma corrente eléctrica, a força lateral responsável pela curvatura das linhas de força eléctrica seria convertida em força magnética que se propagaria deixando as partículas dos materiais por onde passasse num estado de tensão, que Faraday designou de estado electrotónico, o qual, segundo Faraday, corresponde a uma tendência para a produção de correntes.

Nos condutores, o movimento destes em relação às linhas de força magnética provocaria uma corrente eléctrica induzida proporcional ao número de linhas de força interceptadas pelo condutor.

O paramagnetismo e o diamagnetismo seriam resultado da diferente condutibilidade das linhas de força magnética.

Finalmente a luz poderia ser explicada como vibrações transversais das linhas de força.

## VI. Reacção à investigação e descobertas de Faraday

Faraday foi reconhecido pelas suas descobertas experimentais mas completamente ignorado quanto às suas ideias acerca da natureza da matéria e das linhas de força (nomeadamente, quanto às linhas de força existirem no próprio espaço vazio de matéria e constituírem a própria matéria).

Na Alemanha, Franz Neumann e Wilhelm Weber, seguindo o exemplo de Ampère, procuram fórmulas de acção à distância, essencialmente newtonianas, para explicar os fenómenos descobertos por Faraday, sem sequer se darem ao trabalho de o citar.

Quanto aos seus compatriotas, nomeadamente William Thomson e James Clerk Maxwell, estes deram algum crédito às suas ideias acerca das linhas de força mas reinterpretaram-nas de acordo com as suas próprias ideias metafísicas.

Vejamos, pela ordem temporal, os trabalhos destes cientistas.

### 6.1 Os trabalhos de Neumann e Weber

O Alemão Franz Neumann foi o primeiro a desenvolver um modelo matemático da indução electromagnética.

Em 1845, baseando-se na ideia de que a corrente induzida seria tal que a força magnética entre a corrente indutora e a corrente induzida se oporia ao movimento relativo entre o condutor e a corrente, Neumann mostrou que a corrente induzida era dada pela variação no tempo de uma certa função matemática a que se chamou potencial de Neumann.

Este seu modelo forneceu regras de cálculo para a corrente eléctrica induzida mas não foi mais longe do que Ampère no esclarecimento da natureza das correntes e da sua relação com a electrostática .

Já Weber, no ano seguinte, avançou com uma conjectura que tentava explicar, simultaneamente, a electrostática, a indução electromagnética e o magnetismo, além de propor uma hipótese para a rotação magnética do plano de polarização da luz, resumindo tudo à interacção entre fluídos eléctricos.

A referida conjectura pressupunha que existiriam cargas eléctricas (pontos materiais newtonianos com carga eléctrica associada) positivas e negativas que actuariam umas sobre as outras, por meio de uma força de acção à distância que dependia, não só da distância entre as cargas, mas também, da variação no tempo dessa distância.

Mais precisamente, Weber juntou à lei de Coulomb, que explicava a electroestática com uma força dependente da distância entre as cargas, uma parcela que dependia da variação com o tempo da distância entre as cargas – variação essa a que chamou “velocidade relativa” – e outra parcela que dependia da variação da “velocidade relativa” – variação essa, que Weber designou de “aceleração relativa”<sup>18</sup>.

O termo dependente da “velocidade relativa” permitia explicar a atracção e repulsão de correntes, ao passo que a outra parcela, dependente da “aceleração relativa” das cargas, não só garantia a dedução da lei de Ampère mas também permitia explicar a indução electromagnética.

Embora a lei para a interacção entre as partículas eléctricas descrevesse uma força entre partículas distantes, Weber admitiu a possibilidade de esta ser resultado de uma acção mediada por um meio transmissor que preencheria todo o espaço. Com efeito, ao discutir a sua fórmula para a interacção entre duas cargas, Weber afirma que “é ... possível conceber que as forças incluídas na lei fundamental ... devem depender, primeiro de todo o meio transmissor, e depois de todos os corpos que actuam neste meio”. [Weber, 1846, pág141].

Continuando a discussão, Weber nota que a ideia de um meio transmissor está incluída na ideia, anteriormente proposta por alguns físicos, de um fluido eléctrico neutro que preencheria todos os interstícios de matéria ponderável. Embora fora dos condutores tenha escapado à observação qualquer fluido eléctrico, Weber considera que existe a possibilidade de com novas técnicas este vir a ser estudado.

Weber sugere ainda que nos não-condutores podem surgir, ao invés de correntes, vibrações deste fluido e afirma que, tendo em conta a descoberta de

---

<sup>18</sup> A variação no tempo da distância entre as cargas não é o mesmo que a velocidade relativa das mesmas, nem a segunda derivada da distância corresponde à aceleração relativa. Basta ver que se tivermos um corpo a rodar em torno de outro segundo uma circunferência não há variação no tempo da distância entre os corpos mas há velocidade relativa e há aceleração relativa. Weber não se apercebeu disto e chamou “velocidade relativa” e “aceleração relativa” à primeira e segunda derivada em ordem ao tempo da distância entre as cargas.

Faraday da rotação magnética do plano de polarização da luz, “isso torna provável que o meio eléctrico neutro seja ele mesmo esse ... éter, que cria e propaga as vibrações de luz, ou que os dois estejam tão intimamente interligados, que observações das vibrações de luz possam explicar o comportamento do meio neutro” [Weber, 1846, pág.142].

Weber levanta assim a hipótese de unificação dos fenómenos electromagnéticos e ópticos, ao mesmo tempo que unifica a electricidade estática e a electrodinâmica por meio da sua lei da interacção entre cargas eléctricas.

Esta conjectura de Weber, ao considerar forças dependentes da “velocidade relativa” e da “aceleração relativa” das partículas, viola o princípio newtoniano de que as forças que representam uma acção directa à distância dependeriam apenas das posições relativas das partículas. Por outro lado, vai contra a ideia de acção directa à distância ao levantar a hipótese de a acção ser mediada. Contudo, importa realçar que para descrever esta mediação poderíamos utilizar as leis de Newton.

## 6.2 O “acolhimento” das ideias de Faraday em Cambridge

Enquanto os alemães desenvolviam modelos matemáticos e conjecturas acerca dos fenómenos electromagnéticos, em Cambridge, William Thomson resolvia problemas de electrostática estabelecendo uma analogia com os fenómenos calorimétricos.

Com efeito, a equação que descreve o potencial electrostático associado com uma certa distribuição de carga eléctrica é idêntica à equação que descreve a distribuição de temperatura num sólido em contacto com fontes de calor no caso estacionário, em que, nem a temperatura no sólido, nem a temperatura das fontes de calor variam no tempo.<sup>19</sup> Para obter uma equação a partir da outra basta substituir o potencial electrostático pela temperatura, as cargas eléctricas pelas fontes de calor e

---

<sup>19</sup> A equação que descreve o potencial electrostático gerado por uma distribuição de carga é a equação de Poisson:  $\nabla^2 V = -\rho/\varepsilon$ , onde  $V$  é o potencial electrostático,  $\rho$  a distribuição de carga eléctrica e  $\varepsilon$  a capacidade indutiva específica (quando se considera, como Thomson considerava, a permeabilidade eléctrica do ar igual a 1). A equação que descreve a distribuição de temperatura num sólido, no caso estacionário, em função das fontes de calor é a equação do calor para o caso estacionário:  $\nabla^2 u = -f/\eta$ , onde  $u$  é a temperatura,  $f$  as fontes de calor e  $\eta$  o coeficiente de difusão térmica.

a capacidade indutiva específica do meio pelo coeficiente de difusão térmica. Desta forma, os problemas de electroestática podem ser convertidos em problemas de termodinâmica e vice-versa.<sup>20</sup>

A existência desta analogia mostrava que a acção electroestática podia ser matematicamente tratada como uma acção mediada, idêntica à que Faraday defendia ser a acção electroestática.

Thomson reconheceu isso mesmo no artigo de 1845, intitulado “On the Mathematical Theory of Electricity in Equilibrium”. Depois de indicar como os problemas de electroestática podiam ser convertidos em problemas da dinâmica de calor, Thomson escreveu:

“... é, sem dúvida, possível que tais forças de acção à distância [as forças entre cargas eléctricas] possam ... ser produzidas inteiramente pela acção de partículas contíguas de algum meio interveniente, e temos a analogia para isto no caso do calor, onde certos efeitos que obedecem às mesmas leis são sem dúvida propagados de partícula a partícula.” [Thomson, 1845, pág. 37]

Thomson reconheceu também que as ideias e métodos de Faraday se podem compreender com base na analogia com a transmissão do calor, considerando as linhas de força como linhas de fluxo do calor, isto é, linhas tangentes em cada ponto à direcção de propagação do calor, as cargas eléctricas como fontes de calor, e a capacidade indutiva específica como a condutibilidade térmica do meio. Thomson dá, assim, algum crédito às ideias de Faraday.

No entanto, não se julgue que Thomson pretendia defender as concepções de Faraday contra as de acção à distância. O que Thomson fez foi mostrar que os dois métodos de raciocínio, as linhas de força de Faraday e a análise por forças de acção à distância eram matematicamente equivalentes.

Com efeito, ao mesmo tempo que mostra que as concepções de Faraday podem ser compreendidas com base na analogia com a transmissão do calor,

---

<sup>20</sup> Thomson não expôs a analogia da forma em que eu aqui a expus. Thomson limitou-se a indicar, com recurso a exemplos, como um problema de electroestática pode ser convertido num problema de termodinâmica, e a afirmar que “... a qualquer problema relativo à distribuição de electricidade nos condutores, ou às forças de atracção e repulsão de corpos electrizados, corresponde um problema de movimento uniforme do calor que apresente as mesmas condições analíticas, e que, portanto, de um ponto de vista estritamente matemático, é o mesmo problema”. [Thomson, 1845, p. 27]

Thomson mostra também que a capacidade indutiva específica dos dieléctricos podia ser compreendida no quadro de acção à distância. Para isso, Thomson mostra que os fenómenos electrostáticos envolvidos na indução electrostática se podem explicar supondo a polarização das moléculas do dieléctrico num grau proporcional à força eléctrica que actua sobre ele.

Depois de estudar os fenómenos electrostáticos, Thomson dedicou-se ao estudo do magnetismo. Thomson começou por produzir um modelo matemático para o diamagnetismo e o paramagnetismo, no quadro da acção à distância. Segundo este modelo, quer nos materiais magnéticos, quer nos materiais paramagnéticos, surgiriam dipolos magnéticos por efeito da força magnética. O grau de polarização magnética seria proporcional à força magnética que actua sobre o material. Nos materiais diamagnéticos a polarização seria contrária à que ocorre nos materiais ferromagnéticos (ímanes) e nos materiais paramagnéticos. As forças magnéticas sobre os dipolos magnéticos, quer os dos materiais diamagnéticos, quer os dos materiais paramagnéticos, seriam responsáveis pelo movimento destes materiais em relação às linhas de força.

Depois de mostrar como os fenómenos diamagnéticos e paramagnéticos se podiam explicar por meio de forças de acção à distância, Thomson, numa nota de rodapé<sup>21</sup> que adicionou ao artigo sobre electrostática acima referido, indicou como a analogia com a transmissão do calor podia ser estendida aos fenómenos diamagnéticos e paramagnéticos. Neste caso, a influência dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos sobre as linhas de força magnética seria idêntica, respectivamente, à influência de um material com menor ou maior condutibilidade térmica sobre as linhas de fluxo de calor. Desta forma, a condutibilidade térmica poderia ser considerada análoga à condutibilidade das linhas de força magnética introduzida por Faraday.

Assim, Thomson, com as suas analogias fez a ponte matemática entre a acção à distância e as linhas de força de Faraday, abstendo-se de defender uma ou outra interpretação.

---

<sup>21</sup> Ver, *ibidem*, p. 33.

Para além destas analogias, que tinham como único objectivo considerar a equivalência matemática de leis e métodos de resolução de problemas de diferentes áreas, Thomson estabeleceu analogias entre os estados de tensão num sólido elástico e incompressível e, tal como as designou, as forças electrostáticas, magnéticas e galvânicas<sup>22</sup>, dando assim uma interpretação mecânica dos estados de tensão referidos por Faraday. Não se comprometeu, contudo, com a ideia de que os estados de tensão fossem a causa das forças, limitando-se a mostrar matematicamente que as equações que descrevem certos estados de tensão eram análogas às equações que descrevem as forças electrostáticas, magnéticas e galvânicas.

Finalmente, Thomson propôs que o efeito de rotação do plano de polarização da luz fosse devido à existência, no interior das moléculas, de vórtices de um éter mecânico, isto é, de matéria do referido éter em rotação. Estes alinhar-se-iam sob a acção da força magnética, isto é, os seus eixos ficariam alinhados na direcção da força magnética. Este alinhamento seria responsável, quer pela rotação magnética do plano de polarização quer pela magnetização dos corpos. Thomson forneceu, assim, o primeiro modelo de um éter mecânico que procurava não só servir de base às ondas de luz, mas também aos fenómenos magnéticos.

Como veremos de seguida, Maxwell estendeu esta ideia de Thomson.

---

<sup>22</sup> As forças galvânicas são as forças magnéticas associadas às correntes.



## VII. As teorias electromagnéticas de Maxwell e Lorentz

### 7.1 O artigo “On Faraday Lines of force”

Foi por sugestão de Thomson que Maxwell estudou a teoria electromagnética de Faraday, e o seu primeiro artigo em electromagnetismo começa com uma analogia matemática semelhante às de Thomson.

Mais precisamente, nesse primeiro artigo, designado “On Faraday’s lines of force”, Maxwell começa por desenvolver uma analogia em que as linhas de força eléctrica ou magnética eram consideradas análogas a tubos através dos quais um fluido incompressível, com origem nas cargas eléctricas ou magnéticas, se movia com velocidade proporcional à intensidade eléctrica (actual vector campo eléctrico) ou magnética (actual vector campo magnético  $\vec{H}$ ).

Na segunda parte do referido artigo, Maxwell partindo da informação que se possuía sobre as forças eléctricas e magnéticas, escreveu a actual lei de Ampère na forma diferencial para o caso em que as correntes de deslocamento poderiam ser consideradas desprezáveis (veremos mais à frente o que são estas correntes) e forneceu uma expressão quantitativa para o estado electrotónico de Faraday.

A segunda parte do artigo começa com a definição de quantidade de corrente eléctrica numa dada direcção. Maxwell definiu quantidade de corrente eléctrica, num dado ponto e numa dada direcção como “a quantidade de electricidade que atravessa a unidade de área, nesse ponto, perpendicular à direcção dada” [Maxwell, 1856, pág.190]. No caso de a corrente não ser uniforme seria “a quantidade de electricidade que atravessaria essa área supondo o fluxo uniformemente igual ao [fluxo] no ponto dado” [Ibidem]. Por outras palavras, seria a quantidade de electricidade que atravessaria a unidade de área perpendicular à direcção dada, se a corrente fosse uniforme e igual à corrente no ponto dado.

Nesta definição, Maxwell não indicou o intervalo de tempo durante o qual se contabilizaria a electricidade que atravessa a dita área. Percebe-se contudo, que seria um intervalo de tempo unitário. Maxwell também não indicou em que sentido se deveria contabilizar a quantidade de electricidade que atravessa a referida área. No

entanto, subentende-se que seria a quantidade de electricidade que atravessa a área num sentido menos a que atravessa no sentido oposto. Além disso, Maxwell não nos diz se se está a referir à electricidade vítrea ou resinosa, pelo que, ficamos sem saber o que é a “quantidade de electricidade”. Mais à frente, contudo, percebe-se que é o que actualmente se designa por quantidade de carga livre<sup>23</sup>.

Em seguida, Maxwell afirma que a quantidade de electricidade que atravessa por unidade de tempo a área elementar  $ds$  é dada por  $ds(la_2 + mb_2 + nc_2)$ , onde  $l$ ,  $m$ ,  $n$  são, respectivamente, os co-senos directores da normal a  $ds$ ; e  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  são, respectivamente, a quantidade de corrente eléctrica na direcção dos eixos  $x, y, z$ . Por outras palavras, é o produto da área infinitesimal pela quantidade de corrente eléctrica segundo a direcção normal à área.

Importa notar que a quantidade  $ds(la_2 + mb_2 + nc_2)$  só fica definida quando se indica o sentido da normal<sup>24</sup>. Como o sentido da normal deve ser o sentido em que se contabiliza a quantidade de electricidade que atravessa a superfície, indicar o sentido da normal implica indicar o sentido em que se contabiliza a quantidade de electricidade que atravessa a superfície. Desta forma, a quantidade  $ds(la_2 + mb_2 + nc_2)$  só fica definida quando se indica o sentido em que se contabiliza a quantidade de electricidade que atravessa a superfície. Consequentemente,  $ds(la_2 + mb_2 + nc_2)$  não indica a quantidade de electricidade que atravessa a superfície por unidade de tempo, mas sim a quantidade de electricidade que atravessa a superfície por unidade de tempo, *num dado sentido*.

De notar também que, de acordo com as definições de Maxwell de  $a_2$ ,  $b_2$  e  $c_2$ , o vector  $(a_2, b_2, c_2)$ , que designarei aqui por vector corrente eléctrica, é idêntico ao vector actualmente designado por densidade de corrente eléctrica livre<sup>25</sup>.

---

<sup>23</sup> A electricidade a que Maxwell se está a referir aqui é a electricidade associada unicamente aos condutores, sem levar em conta a electricidade nos dieléctricos. Hoje em dia este tipo de electricidade designa-se por carga eléctrica livre.

<sup>24</sup> A normal é um vector unitário perpendicular à superfície. Dado que existem dois vectores nestas condições, com a mesma direcção, mas sentidos contrários, não se pode falar de normal sem se definir o seu sentido.

<sup>25</sup> O vector densidade de corrente eléctrica livre é o vector que resulta do actual vector densidade de corrente quando se subtrai a este a densidade de corrente que, nas aplicações actuais da electrodinâmica clássica, se associa com a magnetização. Maxwell nunca considerou que houvesse quaisquer correntes associadas com a magnetização. Por isso para Maxwell a corrente eléctrica não é mais que a actual corrente livre.

Depois de definir quantidade de corrente numa dada direcção e de determinar a quantidade de electricidade que flui, por unidade de tempo, através de uma superfície elementar, Maxwell analisou as forças electromotrizes e a sua relação com a quantidade de corrente. Maxwell afirmou então que “[O] fluxo de electricidade em qualquer ponto de um condutor é devido às forças electromotrizes que actuam nesse ponto” [Maxwell, 1856, pág.190].

Continuando a análise das forças electromotrizes, Maxwell notou que estas podem ser de dois tipos: internas e externas. As internas resultariam da diferente tensão eléctrica (potencial electrostático) em diferentes pontos do condutor, da variação na composição química e da descontinuidade da temperatura nalgum ponto do condutor. As externas resultariam “do movimento relativo entre correntes e ímanes, ou da variação da sua intensidade ou de outras causas actuando à distância” [Maxwell, 1856, pág.190].<sup>26</sup>

Maxwell indicou também que a força electromotriz seria proporcional à corrente eléctrica sendo a constante de proporcionalidade a resistência do meio (em linguagem actual a condutibilidade eléctrica do meio). Acrescentou depois que a força electromotriz representaria a intensidade da acção eléctrica.

Maxwell definiu ainda a função  $\rho(x)$  por meio da equação<sup>27</sup>:

$$\frac{da}{dx} + \frac{db}{dy} + \frac{dc}{dz} = 4\pi\rho$$

onde  $a, b, c$ , são, respectivamente, as componentes da força electromotriz segundo  $x, y, z$ . **Desta forma, acrescento eu,  $\rho$  é a quantidade de electricidade por unidade de volume.**<sup>28</sup>

---

<sup>26</sup> O facto de Maxwell falar de causas actuando à distância não quer dizer, obrigatoriamente, que a acção não seja mediada. Implica apenas que a origem da acção esteja distante.

<sup>27</sup> Maxwell, 1856, pág. 192

<sup>28</sup> Em notação vectorial esta equação escreve-se  $\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$  onde  $\vec{E}$  é a força electromotriz e  $\rho$  deverá ser a quantidade de electricidade livre por unidade de volume. Esta equação deriva da equação de Poisson, em unidades não racionalizadas, isto é, em que a lei de Coulomb não leva o factor  $\frac{1}{4\pi}$ :  $-\nabla^2 V = 4\pi\rho$ , onde  $V$  é o potencial electrostático e  $\rho$  é a quantidade de electricidade livre por unidade de volume. Recorde-se que esta última corresponde, em linguagem actual, à densidade de carga livre, que, recorde-se também, é a densidade de carga eléctrica excluindo a carga nos dieléctricos. Esta equação de Poisson ignora a existência de polarização eléctrica nos dieléctricos. Para dar conta da polarização eléctrica esta equação deveria escrever-se:

$$-\nabla^2 V = 4\pi \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Terminadas as considerações sobre as forças electromotrizes, Maxwell passou para a análise do magnetismo. Neste ponto Maxwell notou que as equações que relacionam entre si a indução magnética, as forças magnetizadoras, a resistência à indução magnética, a tensão ou potencial magnético escalar<sup>29</sup> e a densidade de matéria magnética são idênticas às equações que relacionam entre si as forças electromotrizes, as correntes, a tensão eléctrica, a resistência (eléctrica) do meio, e a função  $\rho$ , desde que se faça corresponder à indução magnética a corrente eléctrica, às forças magnetizadoras as forças electromotrizes, à resistência à indução magnética a resistência (eléctrica) do meio, à tensão ou potencial magnético a tensão electrostática, e à densidade de matéria magnética a função  $\rho$ , que, como vimos, é a quantidade de electricidade por unidade de volume.

Desta forma tem-se, em particular, que a indução magnética é proporcional à força magnetizadora, sendo a constante de proporcionalidade a resistência à indução magnética. Mais à frente no artigo, Maxwell afirma que a intensidade magnética é o mesmo que a força que actua num pólo magnético unitário sul (no vazio, acrescento eu)<sup>30</sup>. Uma vez que Maxwell considerou que as forças electromotrizes representam a intensidade da acção eléctrica e que são análogas às forças magnetizadoras, conclui-se que a intensidade magnética seria a força magnetizadora e, consequentemente, que a força magnetizadora seria igual à força que actua num pólo magnético unitário sul. Mais uma vez, acrescento eu, “no vazio”.

Depois de notar a analogia acima referida entre as grandezas magnéticas e as grandezas eléctricas, Maxwell analisou a relação entre a força magnetizadora e as correntes eléctricas que a originam. Para isso, Maxwell começou por notar que a força magnetizadora total numa curva fechada à volta de uma corrente eléctrica, isto é, em

---

onde  $\epsilon_0$  é a actual permissividade eléctrica do vazio e  $\epsilon_r$  é a capacidade indutiva específica dos dieléctricos, tal como Faraday a definiu: razão entre a diferença de potencial entre dois corpos carregados separados por um dado dieléctrico e a diferença de potencial entre os mesmos dois corpos quando separados por ar. Neste artigo Maxwell desconsidera a polarização dos dieléctricos e por isso comete o mesmo erro que Poisson que nem se quer sabia da existência de tal polarização.

<sup>29</sup> Em vez de potencial escalar, Maxwell escreve “tensão ou potencial magnético” [Maxwell, 1856, pág.192]. No entanto, reconhecemos que é o potencial escalar, pois Maxwell considera-o análogo ao potencial eléctrico. Além disso, Maxwell nunca fala em potencial vector.

<sup>30</sup> A definição só é válida no vazio e no ar, onde, nas unidades em que Maxwell trabalha, a condutibilidade magnética do meio ou, como Maxwell lhe chama neste artigo, a resistência magnética do meio, é igual a 1. Noutros meios, a força magnética que actua num pólo unitário sul é a força que actua no mesmo pólo no vazio multiplicada pela resistência magnética do meio, ou seja, é o que Maxwell chama aqui de indução magnética.

linguagem actual, **o integral (soma), ao longo da curva, da componente da força magnetizadora tangente à curva, não depende da curva, mas apenas da corrente eléctrica que atravessa a superfície delimitada pela curva.** Segundo Maxwell, isto implicaria que o dito integral fosse uma medida da quantidade de corrente eléctrica que passa através da superfície delimitada pela curva.<sup>31</sup>

Maxwell calcula então o valor do integral da força magnetizadora sobre a curva que delimita a área infinitesimal  $dydz$ , perpendicular ao eixo dos  $xx$ , e iguala o resultado à quantidade de corrente eléctrica que atravessa a área<sup>32</sup>. Maxwell obtém, assim, a equação que relaciona a corrente eléctrica segundo  $x$  com a força magnetizadora. Raciocinando de forma análoga para a quantidade de corrente segundo  $y$  e segundo  $z$ , Maxwell obtém as seguintes equações que relacionam a corrente eléctrica com a força magnetizadora<sup>33</sup>:

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= \frac{d\beta_1}{dz} - \frac{d\gamma_1}{dy} \\ b_2 &= \frac{d\gamma_1}{dx} - \frac{d\alpha_1}{dz} \\ c_2 &= \frac{d\alpha_1}{dy} - \frac{d\beta_1}{dx} \end{aligned} \right\}$$

onde  $a_2$ ,  $b_2$  e  $c_2$  são, respectivamente, a quantidade de corrente eléctrica segundo  $x, y, z$  e  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  são, respectivamente, as componentes da força magnetizadora segundo  $x, y, z$ .<sup>34</sup>

**Segundo estas equações, as linhas de força magnética associadas com uma corrente eléctrica formam círculos em torno da corrente eléctrica, no plano**

<sup>31</sup> Segundo nos diz Oliver Darrigol [Darrigol, 2000, pág 142, nota de rodapé nº10 e parágrafo correspondente], Maxwell já tinha chegado a esta mesma conclusão, numa carta que escreveu a William Thomson, datada de 13 de Novembro de 1854. Esta é já uma formulação da actualmente designada lei de Ampère. O que Maxwell deduz a seguir é a forma diferencial da lei de Ampère.

<sup>32</sup> Maxwell não define o que é a quantidade de corrente eléctrica que atravessa uma superfície mas pressupõe-se que seja igual à quantidade de electricidade que atravessa a superfície por unidade de tempo. Aplica-se, portanto, a fórmula dada anteriormente, segundo a qual, a quantidade de electricidade que flui, por unidade de tempo, através da superfície infinitesimal  $ds$  é dada pelo produto da área elementar  $ds$  pela quantidade de corrente eléctrica segundo a direcção normal à área.

<sup>33</sup> Maxwell, 1856, pág. 194

<sup>34</sup> As equações anteriores são equivalentes, em notação vectorial, à equação  $\vec{J} = -\nabla \times \vec{H}$ , onde  $\vec{J}$  é o vector cujas componentes são a quantidade de corrente eléctrica segundo  $x, y, z$ , e que é actualmente designado densidade de corrente,  $\vec{H}$  é a força magnetizadora e “ $\nabla \times$ ” denota o operador rotacional. Recorde-se que, neste artigo, Maxwell considera a força magnetizadora como a força que actua num pólo magnético sul, o que faz com que tenha sentido contrário ao actual vector campo magnético, daí o sinal de menos que não aparece na actual lei de Ampère

perpendicular a esta e têm o sentido dado pela regra da mão direita, conforme ilustrado na figura seguinte. O módulo da força magnética sobre o pólo de um íman é proporcional à quantidade de corrente eléctrica e inversamente proporcional ao quadrado da distância à corrente.

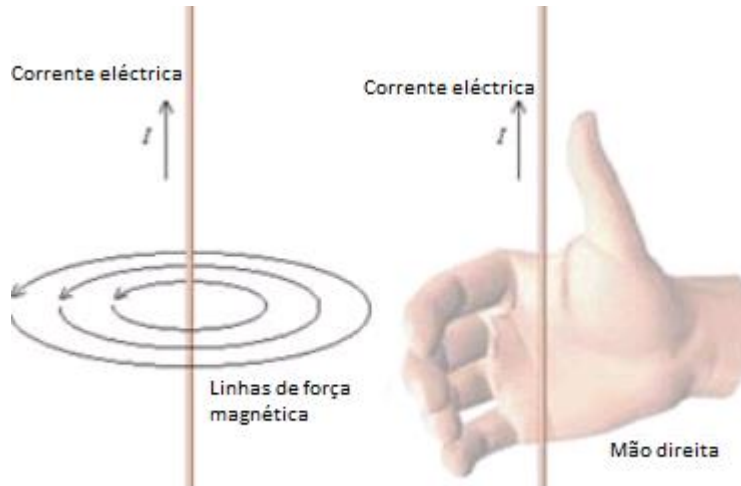


Figura 6: À esquerda: linhas de força magnética em torno de uma corrente eléctrica. À direita: ilustração da regra da mão direita

Quanto à lei da indução electromagnética, Maxwell começou por mostrar que para quaisquer três funções  $a_1, b_1, c_1$  existem três funções  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  e uma função  $V$  tais que<sup>35</sup>:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{d\beta_0}{dz} - \frac{d\gamma_0}{dy} + \frac{dV}{dx} \\ b_1 &= \frac{d\gamma_0}{dx} - \frac{d\alpha_0}{dz} + \frac{dV}{dy} \\ c_1 &= \frac{d\alpha_0}{dy} - \frac{d\beta_0}{dx} + \frac{dV}{dz} \end{aligned} \right\}$$

Identificando  $a_1, b_1, c_1$  com as componentes da indução magnética<sup>36</sup>, Maxwell designa  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  por funções electrotónicas (“electro-tonic functions”) ou componentes da intensidade electrotónica.

<sup>35</sup> Em notação vectorial esta equação escreve-se:  $\vec{B} = -\nabla \times \vec{A} + \nabla V$ , onde  $\vec{B}$  é a indução magnética,  $\vec{A}$  a intensidade electrotónica, “ $\nabla \times$ ” o operador rotacional e “ $\nabla$ .” o operador gradiente.

<sup>36</sup> Recorde-se que a indução magnética é definida por Maxwell como o produto da força magnetizadora pela resistência à indução magnética, a qual, corresponde à condutibilidade magnética definida por Faraday, e que, como vimos, isto implica que seja igual à força total exercida sobre um pólo magnético unitário tipo sul.

Admitindo a conservação da energia<sup>37</sup>, Maxwell calcula como a variação da intensidade electrotónica afecta a força electromotriz. Maxwell conclui que a variação da intensidade electrotónica se relaciona com a força electromotriz, no caso em que as correntes se devem unicamente à variação do estado electrotónico, segundo a equação<sup>38</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= -\frac{1}{4\pi} \frac{d\alpha_0}{dt} \\ \beta_2 &= -\frac{1}{4\pi} \frac{d\beta_0}{dt} \\ \gamma_2 &= -\frac{1}{4\pi} \frac{d\gamma_0}{dt} \end{aligned} \right\}$$

onde  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$  são as componentes da força electromotriz, respectivamente, segundo os eixos  $x, y, z$  e  $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$  são as componentes da intensidade electrotónica, igualmente, segundo  $x, y, z$ .<sup>39</sup> **Esta equação significa que a intensidade da força electromotriz induzida é proporcional à variação da intensidade electrotónica.**

Recordando que Faraday, na sua primeira conjectura acerca da indução electromagnética, considerou que as correntes induzidas seriam devidas à variação do estado electrotónico, percebemos que a intensidade electrotónica é uma expressão quantitativa do estado electrotónico de Faraday. De notar, contudo, que, ao contrário do que Faraday propôs na sua primeira conjectura, a intensidade electrotónica não é proporcional à intensidade da força magnética, aqui designada indução magnética.

Importa também notar que a intensidade electrotónica, neste artigo, não está completamente definida, pois falta determinar a função  $V$ . Consequentemente, a lei que Maxwell obtém para a relação entre a intensidade electrotónica e a força electromotriz não determina completamente a relação entre a força electromotriz e a indução magnética. Não se deve esperar, portanto, que coincida com a actual lei para a indução electromagnética.

De notar ainda que Maxwell só sabia calcular o potencial, isto é, em linguagem actual a energia potencial, para sistemas em que as forças são conservativas, isto é,

<sup>37</sup> Mais precisamente, segundo nos diz Maxwell, aplicando o método “dado por Helmholtz no seu artigo sobre Conservação da força” [Maxwell, 1856, pág. 204]. De qualquer forma, os cálculos são idênticos aos que poderíamos fazer hoje, com ligeiras correcções que nada têm a ver com diferentes concepções da conservação da energia.

<sup>38</sup> Maxwell, 1856, pág. 204

<sup>39</sup> Em notação vectorial esta equação escreve-se:  $\vec{E} = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\vec{A}}{dt}$  onde  $\vec{E}$  é a força electromotriz e  $\vec{A}$  a intensidade electrotónica.

podem escrever-se como o gradiente de uma função escalar designada por potencial escalar. A indução magnética não é uma força conservativa. Para resolver esse problema, Maxwell calculou o “potencial do sistema sobre si mesmo” [Maxwell, 1856, pág. 203], isto é, em linguagem actual, a energia potencial, para um sistema em que não há correntes eléctricas<sup>40</sup>, caso em que, segundo Maxwell afirma neste artigo, a indução magnética se podia escrever como o gradiente de um potencial escalar e seria, portanto, conservativa. Depois assumiu que o potencial calculado era válido para quaisquer valores das componentes da indução magnética, ou seja, para qualquer sistema magnético.

## 7.2 O campo electromagnético como resultado de um modelo mecânico do éter: o artigo “On physical lines of force”

No seu segundo artigo, intitulado “On physical lines of force”, Maxwell estabeleceu como objectivo estudar a possibilidade de os fenómenos electromagnéticos serem devidos à acção de um meio, “investigando os resultados mecânicos de certos estados de tensão e movimento num meio, e comparando estes com os fenómenos de magnetismo e electricidade observados” [Maxwell, 1861-2, pág. 452].<sup>41</sup>

Mais precisamente, o que Maxwell fez, foi propor um modelo de éter mecânico, em que as partículas deste último interactuariam umas sobre as outras por meio de forças de contacto newtonianas<sup>42</sup>, com propriedades tais que as forças resultantes sobre cargas magnéticas, correntes eléctricas, condutores e, finalmente, cargas eléctricas, estivessem de acordo com os resultados experimentais conhecidos.

---

<sup>40</sup> Embora Maxwell não diga, o sistema também não pode ter corpos electrizados, se não, a energia potencial do sistema não seria a que Maxwell calcula. Na verdade, o que Maxwell calcula é o que actualmente se designa por energia potencial magnética de um sistema de ímanes.

<sup>41</sup> Neste texto, um estado de tensão significa uma diferença de pressão em diferentes direcções, a qual cria uma força na direcção de maior pressão. Como se pode ver, pouco ou nada tem a ver com a noção de tensão de Faraday.

<sup>42</sup> Recorde-se que, como referido na secção 1.5, Newton considerou dois tipos de forças: as de contacto e as de acção à distância. Maxwell manteve as primeiras, bem como a mecânica de newton, e opôs-se à existência das últimas.



Neste modelo, a matéria seria constituída por éter, só que com densidade diferente da do éter existente no vazio.

Apesar de Maxwell acreditar na existência de um éter mecânico, que preencheria todo o espaço e, que no mínimo, faria parte da constituição da matéria<sup>43</sup>, admitia que este modelo poderia não corresponder ao que o éter mecânico seria na realidade. O objectivo de Maxwell na construção deste modelo não era obter a constituição real do éter, mas sim, analisar que tipo de éter mecânico poderia servir de suporte à descrição dos fenómenos electromagnéticos.

Maxwell foi tão bem sucedido neste último propósito, que as equações que deduziu acabaram por se tornar nas famosas equações de Maxwell, ainda hoje formalmente aceites.

Importa contudo notar que, ao desenvolver um modelo mecânico do campo electromagnético, Maxwell descartou boa parte da metafísica de Faraday, substituindo-a pela sua própria metafísica, baseada na existência de um éter mecânico que preencheria todo o espaço e cujas partículas actuariam apenas por contacto.

Interessa também notar que, embora as equações tenham prevalecido, nenhum modelo mecânico do éter foi alguma vez reconhecido como verdadeiro, tendo, como veremos, o próprio Maxwell abandonado o seu modelo.

### 7.2.1 O modelo do éter

O primeiro passo na construção do modelo do éter foi analisar que tipo de estados de tensão e movimento do éter poderiam dar origem às forças magnéticas. Maxwell concluiu que uma possibilidade seria supor a existência, em todo o éter, e, consequentemente, em todo o espaço, de vórtices constituídos por partículas do éter em rotação, cujo eixo de rotação seria tangente, em cada ponto, às linhas de força magnética. A velocidade de rotação dos vórtices, em cada ponto do espaço, estaria

---

<sup>43</sup> Maxwell não é claro sobre se o éter constituiria, ou não, a matéria. Neste modelo, como dissemos, o éter constituiria a matéria. No entanto, como veremos, no artigo seguinte Maxwell separou as forças electromotrizas e magnetizadoras, supostamente geradas por um éter mecânico, da matéria sobre a qual estas forças actuariam.

relacionada com a força magnética que actua num pólo magnético unitário norte, nesse ponto do espaço segundo a equação:

$$(vl, vm, vn) = (\alpha, \beta, \gamma)$$

onde  $v$  é o módulo da velocidade linear, relativa ao centro do vórtice, das partículas do vórtice na periferia do mesmo,  $l, m, n$  são os co-senos directores do eixo do vórtice,  $(vl, vm, vn)$  é o que Maxwell chama de velocidade de rotação dos vórtices, e  $(\alpha, \beta, \gamma)$  é a força magnética que actua num pólo magnético unitário norte, no vazio<sup>44</sup>.

Por outras palavras, os vórtices seriam perpendiculares às linhas de força magnética, a sua velocidade angular<sup>45</sup>, seria, em módulo, proporcional à intensidade das linhas de força magnética, e a relação entre o sentido de rotação dos vórtices e o sentido das linhas de força magnética seria a indicada na figura seguinte:

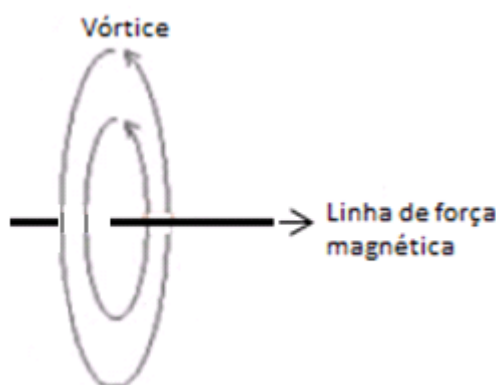


Figura 7: Linha de força magnética e vórtice associado a esta. Note-se a relação entre o sentido de rotação do vórtice e o sentido da linha de força magnética. Se a linha de força magnética tivesse sentido contrário o vórtice rodaria em sentido contrário. O sentido de rotação do vórtice obedece à regra da mão direita em que o polegar aponta no sentido da linha de força magnética e o sentido em que os dedos da mão direita rodam, ao fechar a mão, é o sentido em que os vórtices rodam.

A densidade dos vórtices seria proporcional à condutibilidade magnética, neste artigo designada por capacidade indutiva magnética. Finalmente, a

<sup>44</sup> Maxwell não especifica “no vazio” mas indica que  $(\mu\alpha, \mu\beta, \mu\gamma)$  é a indução magnética, a qual é a força que actua num pólo unitário norte quando este se encontra num meio com condutibilidade magnética  $\mu$ . Como, nas unidades que Maxwell usa,  $\mu = 1$  no vazio, conclui-se que  $(\alpha, \beta, \gamma)$  é a força magnética que actua num pólo unitário norte no vazio.

<sup>45</sup> A velocidade angular dos vórtices é dada por  $\vec{\omega} = \frac{1}{r} v \vec{e}_{eixo} = \frac{1}{r} (vl, vm, vn)$  onde  $r$  é o raio, desconhecido, dos vórtices,  $v$  o módulo da velocidade linear da matéria na periferia dos vórtices,  $\vec{e}_{eixo}$  é o vector unitário com direcção e sentido do eixo dos vórtices e  $(vl, vm, vn)$  é o que Maxwell chama de velocidade de rotação dos vórtices: produto do módulo da velocidade linear dos vórtices pelo vector director do eixo dos vórtices.

variação do momento linear dos vórtices que sucederia se estes parassem de rodar seria idêntica à intensidade electrotónica.<sup>46</sup>

O segundo passo de Maxwell na construção do seu modelo foi introduzir neste as correntes eléctricas. Para isso, Maxwell supôs que existiria uma camada de esferas electricamente carregadas entre os vórtices, que designarei doravante por partículas eléctricas. Nos condutores, estas partículas poderiam movimentar-se e o seu movimento constituiria as correntes eléctricas. A quantidade de corrente eléctrica seria igual ao número de partículas que atravessam, por unidade de tempo, uma unidade de área perpendicular à corrente.<sup>47</sup>

A força dos vórtices sobre as partículas eléctricas constituiria a força electromotriz induzida, responsável pela indução electromagnética. Quando as partículas eléctricas se movem estas fazem variar a velocidade de rotação dos vórtices. Por sua vez, a variação na velocidade de rotação dos vórtices produz corrente eléctrica. Maxwell explica assim a indução electromagnética e, portanto, a força electromotriz induzida.

Para tratar a electricidade estática, Maxwell acrescenta ao modelo a tensão ou potencial eléctrico. Segundo Maxwell, esta seria idêntica à “pressão das partículas [eléctricas], umas sobre as outras” [Maxwell, 1861-2 pág. 490]. Quando existe uma diferença de potencial entre dois pontos de um condutor surge uma corrente eléctrica no condutor. Se o meio não for condutor não surge corrente eléctrica. No entanto, Maxwell nota que, embora a electricidade não atravessasse os meios não condutores, “os efeitos eléctricos propagam-se através deles” e dependem do meio. [Maxwell, 1861-2, pág. 491].<sup>48</sup>

A acção de uma força electromotriz sobre um dieléctrico (não condutor) produziria, um estado de polarização eléctrica semelhante à polarização magnética do

---

<sup>46</sup> Recorde-se que a intensidade electrotónica é o vector que representa o estado electrotónico de Faraday e note-se que, neste artigo, será o simétrico do vector que actualmente se designa por potencial vector do campo de indução magnética  $\vec{B}$ .

<sup>47</sup> Mais precisamente, Maxwell designa por quantidade de corrente eléctrica o vector cuja componente segundo  $x$  é dada pela “quantidade de partículas que atravessa, por unidade de tempo, a unidade de área, na direcção de  $x$ ” [Maxwell, 1861-2, pág.469]. As outras componentes do vector obtêm-se analogamente.

<sup>48</sup> Mais precisamente, Maxwell diz que “a quantidade destes efeitos [efeitos eléctricos] varia de acordo com a natureza do corpo” [Maxwell, 1861-2, pág. 490]

ferro quando este se encontra sob influência de um íman. Mais precisamente Maxwell escreve:

“Num dieléctrico sob indução podemos conceber que a electricidade em cada molécula está de tal modo deslocada que um lado da molécula fica electricamente positivo e o outro negativo, mas que a electricidade se mantém inteiramente ligada com a molécula, e não passa de uma molécula para outra” [Maxwell, 1861-2, pág. 491].

Globalmente a indução eléctrica produziria, sobre um dieléctrico, um deslocamento da distribuição da electricidade relativamente ao seu estado de equilíbrio<sup>49</sup>, ao qual corresponde, no modelo, uma deformação elástica das partículas eléctricas. A elasticidade das partículas eléctricas estaria relacionada com a capacidade indutiva específica de Faraday. Aprofundaremos este tema na secção seguinte.

De seguida, Maxwell explicou que este deslocamento “não corresponde a uma corrente, porque quando atinge um certo valor mantém-se constante, mas é o começo de uma corrente, e as suas variações constituem correntes no sentido positivo ou negativo consoante o deslocamento aumenta ou diminui” [Maxwell, 1861-2, pág.491]. Desta forma, Maxwell introduz a chamada corrente de deslocamento, completando assim o seu modelo mecânico do campo electromagnético.

### 7.2.2 Equações de Maxwell

Com base na primeira parte do modelo, aquela em que Maxwell relaciona a rotação de vórtices com a indução magnética, Maxwell calcula a “força resultante num elemento do meio” através de teoremas da mecânica dos meios contínuos. Obtém então a seguinte equação para a força resultante segundo  $x$ <sup>50</sup>:

---

<sup>49</sup> Maxwell não fala em estado de equilíbrio mas depreende-se que o “deslocamento geral da electricidade” de que Maxwell fala [Maxwell, 1861-2, pág. 491] se refere à passagem do dieléctrico do estado não-polarizado, dito de equilíbrio, para o estado polarizado a qual envolve, como se viu, um deslocamento da electricidade em relação ao seu estado de equilíbrio.

<sup>50</sup> Maxwell, pág. 458

$$X = \alpha \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{d}{dx} (\mu\alpha) + \frac{d}{dy} (\mu\beta) + \frac{d}{dz} (\mu\gamma) \right\} + \frac{1}{8\pi} \mu \frac{d}{dx} (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) \\ - \mu\beta \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right) + \mu\gamma \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \right) - \frac{dp_1}{dx}$$

onde  $\mu$  é a densidade dos vórtices no ponto em que se calcula a força;  $(\alpha, \beta, \gamma) = (vl, vm, vn)$ , onde  $v$  é o módulo da velocidade da matéria constituinte dos vórtices na periferia dos mesmos, e  $l, m, n$  são os co-senos directores do eixo do vórtice, isto é, em linguagem actual,  $(\alpha, \beta, \gamma)$  é igual vector velocidade angular dos vórtices multiplicado pelo raio dos vórtices; e  $p_1$  é a pressão hidrostática do meio (éter). As equações para as outras componentes, segundo nos diz Maxwell, obtêm-se por analogia.<sup>51</sup> **Estas equações não são importantes por si mesmas, o que nos interessa é o que Maxwell retira destas para o electromagnetismo.**

Para interpretar, em termos de grandezas electromagnéticas, a equação anterior, Maxwell começa por notar que “a quantidade total de indução magnética através de uma superfície fechada em torno de um pólo depende inteiramente da força [em linguagem actual, densidade de carga magnética] do pólo” [Maxwell, 1861-2, pág. 459], isto é, em linguagem actual, o fluxo da indução magnética sobre uma superfície fechada em torno de um pólo magnético, depende unicamente da força do pólo, ou seja, da densidade de carga magnética associada com o pólo. Aplicando o teorema da divergência, Maxwell escreve, então, a seguinte equação para a indução magnética gerada pelo pólo de um íman<sup>52</sup>:

$$\left( \frac{d}{dx} (\mu\alpha) + \frac{d}{dy} (\mu\beta) + \frac{d}{dz} (\mu\gamma) \right) dx dy dz = 4\pi m dx dy dz$$

<sup>51</sup> Esta equação é equivalente, em notação vectorial, a:

$$X = \frac{\alpha}{4\pi} \nabla \cdot (\mu \vec{H}) + \frac{\mu}{8\pi} \frac{d}{dx} \vec{H}^2 - \frac{\mu}{4\pi} (\vec{H} \times (\nabla \times \vec{H})) \cdot \vec{e}_x - \frac{dp_1}{dx}$$

onde  $\vec{H} = (\alpha, \beta, \gamma) = (vl, vm, vn)$ , sendo  $v$  a velocidade de rotação da matéria dos vórtices na periferia dos mesmos, e  $l, m, n$  os co-senos directores do eixo dos vórtices, ou seja, do vector velocidade angular dos vórtices;  $\vec{e}_x$  é o vector unitário com a direcção e o sentido do eixo dos  $xx$  e  $p_1$  é a pressão hidrostática do meio (éter).

O vector força  $\vec{F}$  de que  $X$  é a componente segundo o eixo dos  $xx$  pode então escrever-se, por analogia,

$$\vec{F} = \frac{\vec{H}}{4\pi} \nabla \cdot (\mu \vec{H}) + \frac{\mu}{8\pi} \nabla \cdot (\vec{H}^2) - \frac{\mu}{4\pi} (\vec{H} \times (\nabla \times \vec{H})) - \nabla \cdot p_1$$

<sup>52</sup> Maxwell, pág. 459

onde  $\mu\alpha, \mu\beta, \mu\gamma$  são, respectivamente, as componentes da indução magnética segundo  $x, y, z$  e  $m$  é “a quantidade de matéria magnética que aponta para norte, por unidade de volume” [Maxwell, 1861-2, pág. 459]<sup>53</sup>.

**Esta é equação, juntamente com a lei de Ampère na ausência de correntes ( $\nabla \times \vec{H} = 0$ ) dá-nos a indução magnética gerada por um íman de força (em linguagem actual, densidade de carga)  $m$ . A duas equações implicam a conhecida regra de que a intensidade (módulo) da indução magnética gerada pelo pólo de um íman é directamente proporcional à densidade de carga magnética associada com o pólo do íman e inversamente proporcional ao quadrado distância ao íman.**

Aplicando a correspondência entre as grandezas mecânicas e as grandezas electromagnéticas, descrita na secção anterior, a qual fica evidente pelo uso da mesma notação, e, além disso, substituindo a equação anterior na primeira parcela de  $X$ , Maxwell nota que a primeira parcela de  $X$ , que aqui designarei por  $X_1$  e que é

$$X_1 = \alpha \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{d}{dx} (\mu\alpha) + \frac{d}{dy} (\mu\beta) + \frac{d}{dz} (\mu\gamma) \right\}$$

se pode escrever como:<sup>54</sup>

$$X_1 = \alpha m$$

onde  $\alpha$  é “a intensidade da força magnética<sup>55</sup> [segundo  $x$ ]<sup>56</sup>” [Maxwell, 1861-2, pág. 459], e  $m$  é a quantidade de matéria magnética que aponta para norte, por unidade de volume. Maxwell comenta que **“a interpretação física deste termo é que a força que empurra um pólo norte no sentido positivo de  $x$  é o produto da intensidade da força magnética segundo a mesma direcção pela força [em linguagem actual, densidade de carga magnética] do pólo norte do íman”** [Maxwell, 1861-2, pág. 459]. Isto implicaria, que **a primeira parcela de  $X$  fosse a força que actua segundo  $x$**

---

<sup>53</sup> A equação anterior em notação vectorial escreve-se:  $\nabla \cdot \vec{B} = 4\pi m$ . De acordo com o teorema da divergência o fluxo da indução magnética sobre a superfície que delimita o volume infinitesimal  $dx dy dz$  é igual a  $\nabla \cdot \vec{B} dx dy dz$ . Por sua vez a quantidade de matéria magnética no interior do volume infinitesimal  $dx dy dz$ , onde se encontra o pólo magnético, é igual a  $m dx dy dz$  onde  $m$  é a força do pólo ou a quantidade de matéria magnética ou de carga magnética por unidade de volume.

<sup>54</sup> Maxwell, pág. 459

<sup>55</sup> Recorde-se que o vector indução magnética se escreve, na notação de Maxwell,  $(\mu\alpha, \mu\beta, \mu\gamma)$ , logo a intensidade da força magnética  $(\alpha, \beta, \gamma)$  é a indução magnética dividida pela capacidade de indução magnética (condutibilidade magnética)  $\mu$ , a qual é, neste modelo, idêntica à densidade dos vórtices.

<sup>56</sup> Maxwell não escreveu “segundo  $x$ ” mas subentende-se.

sobre o pólo norte de um íman com força (actualmente, densidade de carga magnética)  $m$ . Isto, embora Maxwell não o diga, só é válido no vazio.<sup>57</sup>

A segunda parcela de  $X$ , que designarei por  $X_2$ , é dada por:

$$X_2 = \frac{1}{8\pi} \mu \frac{d}{dx} (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)$$

onde, depois de reinterpretadas as grandezas, por meio da relação estabelecida entre as grandezas mecânicas do éter e as grandezas electromagnéticas, “ $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2$  é o quadrado da intensidade em qualquer ponto do campo<sup>58</sup>” [Maxwell, 1861-2, pág. 460] e  $\mu$  é a capacidade de indução magnética.

Note-se que  $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2$  é o quadrado do módulo do vector  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , cujas componentes são a intensidade da força magnética (ou, como Maxwell lhe chamou no artigo anterior, força magnetizadora) segundo os eixos coordenados. Maxwell está assim, implicitamente, a chamar intensidade do campo (magnético, acrescento eu) ao módulo do vector intensidade da força magnética, que recorde-se, é o vector indução magnética dividido pela capacidade de indução magnética. Esta última é igual a 1 no vazio, nas unidades em que Maxwell trabalha. Consequentemente, **Maxwell designa por intensidade do campo** (magnético, acrescento eu) **o módulo da força que actua no pólo norte de um íman colocado no vazio ou ar** (o ar tem a mesma capacidade de indução magnética que o vazio).

Maxwell interpreta a equação anterior como significando que **“qualquer corpo ... colocado no campo será impelido para zonas de maior intensidade com uma força que depende, em parte, da sua própria capacidade para a indução magnética [condutibilidade magnética], e, em parte, da taxa a que a intensidade magnética aumenta”** [Maxwell, 1861-2, pág. 460, 461].

---

<sup>57</sup> Esta última conclusão a que Maxwell chega, só é válida no vazio ou em meios em que a polarização magnética do meio seja desprezável, pois a força magnética sobre o pólo norte de um íman é, como sabemos hoje, dada pelo produto da indução magnética pela carga magnética do pólo. Na notação de Maxwell isto escreve-se, para a componente da força segundo  $x$ ,  $\mu \alpha m$  e não  $\alpha m$  como Maxwell escreveu. As duas expressões são iguais no vazio onde a capacidade de indução magnética, nas unidades em que Maxwell trabalha, é considerada igual a 1.

<sup>58</sup> Esta não é a primeira vez que Maxwell fala em campo. Maxwell fala em campo desde o seu primeiro artigo sobre electromagnetismo. O que é o campo para Maxwell será discutido na secção 7.4.1, mas para já noto que é algo que existe em todo o espaço e que é responsável pelas forças eléctricas e magnéticas.

Para entendermos esta afirmação comecemos por notar que a força que tem  $X_2$  como componente segundo  $x$ , é a força magnética que actua nos corpos paramagnéticos e diamagnéticos<sup>59</sup> quando não atravessados por correntes de condução. De facto, esta força actua em todos os corpos, mas nas substâncias ferromagnéticas é desprezável face à força magnética que actua sobre os pólos magnéticos permanentes. Quando existem correntes de condução é necessário somar a esta força a força magnética sobre as correntes magnéticas. Tendo em conta que nos materiais diamagnéticos e paramagnéticos a magnetização pode ser descrita como dependendo linearmente das forças magnetizadoras, designarei a força que actua sobre os materiais diamagnéticos e paramagnéticos por força magnética que actua sobre as substâncias linearmente magnetizadas, ou outras simplificações desta designação, conforme o contexto.

Designemos agora por  $H$  a intensidade do campo ( $H^2 = \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2$ ). Com estas definições, a força que actua sobre substâncias linearmente magnetizadas tem as suas componentes dadas por:

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= \frac{1}{8\pi} \mu \frac{dH^2}{dx} \\ Y_2 &= \frac{1}{8\pi} \mu \frac{dH^2}{dy} \\ Z_2 &= \frac{1}{8\pi} \mu \frac{dH^2}{dz} \end{aligned} \right\}$$

onde  $X_2, Y_2, Z_2$  são as componentes, respectivamente, segundo  $x, y, z$ , da força que actua sobre substâncias linearmente magnetizadas.<sup>60</sup>

Estas equações também se podem escrever na forma:

$$(X_2, Y_2, Z_2) = \frac{1}{8\pi} \mu \left( \frac{dH^2}{dx}, \frac{dH^2}{dy}, \frac{dH^2}{dz} \right)$$

onde  $\left( \frac{dH^2}{dx}, \frac{dH^2}{dy}, \frac{dH^2}{dz} \right)$  é o vector gradiente de  $H^2$ .

Desta forma, podemos ver que a força que actua sobre as substâncias linearmente magnetizadas é proporcional ao vector gradiente de  $H^2$ . Este último,

---

<sup>59</sup> Substâncias paramagnéticas e diamagnéticas, recorde-se, são, respectivamente, substâncias que se alinham na direcção paralela ou na direcção perpendicular às linhas de força magnética, e que, ao contrário dos materiais ferromagnéticos não permanecem magnetizadas depois de se desligarem as fontes de indução magnética.

<sup>60</sup> Em notação vectorial as equações anteriores escrevem-se  $\vec{F}_2 = \frac{\mu}{8\pi} \nabla \cdot (H^2)$  onde  $\vec{F}_2$  é a força que actua sobre as substâncias linearmente magnetizadas e " $\nabla$ ." é o operador gradiente.



como Maxwell sabia, embora não lhe chamasse gradiente de  $H^2$ , aponta no sentido em que  $H^2$  aumenta. Visto que a constante de proporcionalidade entre a força e este vector é positiva, porque a capacidade de indução magnética (condutibilidade magnética) é sempre positiva, conclui-se que a força que actua sobre as substâncias linearmente magnetizadas aponta no sentido em que  $H^2$  aumenta, quer estas sejam paramagnéticas ( $\mu > 1$ ), quer estas sejam diamagnéticas, ( $\mu < 1$ ), impelindo-as na referida direcção, ou seja, como Maxwell afirma, na direcção em que a intensidade do campo aumenta<sup>61</sup>.

**Mas então como é que Faraday observou, que os materiais diamagnéticos se deslocam para zonas de menor intensidade da força magnética?**

Maxwell explica:

“ Se um corpo é imerso num meio fluido, então o meio, tal como o corpo, será impelido para lugares de maior intensidade [do campo], de tal forma que a sua pressão hidrostática [a pressão hidrostática do meio] aumentará nessa direcção. O efeito sobre o corpo ... [da pressão hidrostática do meio e da força que impele o corpo, é tal] que o corpo aproximar-se-á ou afastar-se-á de locais de maior intensidade magnética consoante tem maior ou menor capacidade para indução magnética que o meio” [Maxwell, 1861-2, pág. 461]

**A situação é análoga**, noto eu, **ao que acontece quando mergulhamos um corpo num líquido**. Com efeito, a força gravítica impele quer o líquido quer o corpo em direcção à Terra. No entanto, como sabemos, um corpo menos denso que o líquido flutua, movendo-se no sentido contrário à força gravítica (até atingir a superfície do líquido), enquanto um corpo mais denso que o líquido se afunda, movendo-se no sentido da força gravítica.

**O que acontece, quer no caso da força gravítica, quer no caso da força magnética que actua sobre as substâncias linearmente magnetizadas, é que estas causam um aumento de pressão dos fluidos na direcção da força: a pressão hidrostática gravítica aumenta com a profundidade do líquido, a pressão hidrostática no modelo do éter de Maxwell aumenta com a intensidade do campo magnético. Isto gera uma força contrária à força gravítica ou à força magnética, que no caso do**

---

<sup>61</sup> Recorde-se que a intensidade do campo é o módulo da força que actua num pólo magnético no vazio.

fluido ser actuado pela força gravítica se designa por impulsão e que no caso do fluido ser actuado por uma força magnética que podemos designar por impulsão magnética. Ficamos assim com duas forças contrárias aplicadas no corpo: a força magnética/gravítica e a impulsão magnética/gravítica. No caso da força magnética sobre um corpo paramagnético ou diamagnético, imerso num fluido, a força resultante é, como iremos mostrar a seguir, proporcional à diferença entre a capacidade de indução magnética do corpo e a capacidade de indução magnética do meio. Daí que corpos com maior capacidade de indução magnética que o meio, em particular materiais paramagnéticos ( $\mu > 1$ ) no ar ( $\mu = 1$ ), se movam para zonas de maior intensidade do campo (tal como Faraday observara) e corpos com menor capacidade de indução magnética que o meio, em particular corpos diamagnéticos ( $\mu < 1$ ) no ar, se movam para zonas de menor intensidade do campo (tal como Faraday observara).

Passemos agora à demonstração de que a força resultante sobre um corpo paramagnético ou diamagnético, imerso num fluido, é, como dissemos atrás, proporcional à diferença entre a capacidade de indução magnética do corpo e a capacidade de indução magnética do meio.

A força magnética que actua sobre um corpo diamagnético ou paramagnético imerso num fluido, é dada por

$$\vec{F}_m = \frac{1}{8\pi} \mu_c \nabla \cdot H^2$$

onde  $\mu_c$  é a capacidade de indução magnética do corpo, cujo valor é diferente para os corpos paramagnéticos e para os corpos diamagnéticos.

Para deduzirmos a expressão da impulsão magnética, consideremos uma porção do fluido com forma cúbica, em que a força magnética é perpendicular a uma das suas faces e orientada verticalmente de baixo para cima. Na base do cubo actuará uma pressão magnética (por analogia à pressão hidrostática)  $P_0$  que geraria uma força  $P_0 A$ , sendo  $A$  a área da face do cubo. Sobre a face superior do cubo actuará uma pressão magnética  $P_1$  que exerceria sobre a dita face uma força  $-P_1 A$ . Finalmente, actuará sobre este cubo de fluido a força magnética que é proporcional à capacidade de indução magnética do fluido. Para que o fluido não se mova, a resultante das forças exercidas sobre ele deve ser nula, logo,  $P_0 A - P_1 A = -\frac{1}{8\pi} \mu_f \|\nabla \cdot H^2\|$ , onde  $\mu_f$  é a

capacidade de indução magnética do fluido. A impulsão magnética seria então  $I_m = P_0 A - P_1 A$  e, portanto,

$$I_m = -\frac{1}{8\pi} \mu_f \|\nabla \cdot H^2\|$$

Consequentemente, a resultante das forças sobre o corpo, na direcção da força magnética, é dada por

$$F_m + I_m = \frac{1}{8\pi} \mu_c \|\nabla \cdot H^2\| - \frac{1}{8\pi} \mu_f \|\nabla \cdot H^2\| = \frac{1}{8\pi} (\mu_c - \mu_f) \|\nabla \cdot H^2\|$$

onde  $\mu_f$  é a capacidade de indução magnética do fluido e  $\mu_c$  é a capacidade de indução magnética do corpo. **Desta forma, fica claro que, como dissemos antes, a força resultante sobre o corpo é proporcional à diferença entre a capacidade de indução magnética do corpo e a capacidade de indução magnética do fluido.**

A terceira parcela de  $X$  é:

$$X_3 = -\mu\beta \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right)$$

onde, depois de considerada a equivalência entre as grandezas mecânicas e as grandezas magnéticas,  $\mu$  é a capacidade de indução magnética (condutibilidade magnética, segundo Faraday) e  $\alpha, \beta$  são as componentes segundo  $x, y$  da intensidade da força magnética (em linguagem actual campo magnético  $\vec{H}$ )<sup>62</sup>.

Para interpretar este termo, Maxwell começa por notar que  $\mu\beta$  é a “quantidade de indução magnética através da área unitária perpendicular a  $y$ ” [Maxwell, 1861-2, pág. 462], ou seja, digo eu, é a componente da indução magnética segundo  $y$ . Depois nota que  $\left( \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right)$  é o trabalho realizado pela força que actua no pólo norte de um íman quando este descreve uma curva que delimita uma área unitária no plano  $xy$ , movendo-se no sentido em que passa do eixo dos  $xx$  para o eixo dos  $yy$ . Esta afirmação, noto eu, resultou da aplicação implícita do teorema de Stokes<sup>63</sup> ao integral

---

<sup>62</sup> A equação anterior escreve-se, em linguagem vectorial,  $X_3 = \mu\beta(\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{e}_z$ , onde  $\mu$  é a capacidade de indução magnética,  $\vec{H} = (\alpha, \beta, \gamma)$  é o vector intensidade da força magnética, e  $\vec{e}_z$  é um vector unitário segundo o eixo dos  $zz$

<sup>63</sup> O teorema de Stokes, diz que o integral de um vector  $F$  ao longo de uma curva que delimita uma superfície  $S$  é igual ao integral sobre a superfície  $S$  do rotacional do vector  $F$ . Em notação vectorial temos:

$$\oint \vec{F} \cdot \vec{e}_\theta d\theta = \iint (\nabla \times \vec{F}) \cdot \vec{N} dS$$

que define o referido trabalho, levando em conta, embora Maxwell não o diga, que o íman tem de ter carga magnética unitária e estar no vazio ou no ar, de modo que a força que actua no pólo norte do íman seja dada pelo vector intensidade da força magnética, que é o vector  $(\alpha, \beta, \gamma)$ .<sup>64</sup>

Depois desta afirmação, Maxwell nota que se existir, no centro da superfície delimitada pela curva que o íman percorre, uma corrente eléctrica perpendicular à superfície e com o sentido do eixo dos  $zz$ , o trabalho realizado pela força que actua no pólo norte do íman é dado por<sup>65</sup>  $[W =] 4\pi r$  onde  $r$  é a quantidade de corrente eléctrica que atravessa a unidade de área perpendicular ao eixo dos  $zz$  e  $W$  o trabalho. Consequentemente, continua Maxwell,  $\frac{1}{4\pi} \left( \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right)$  “representa a quantidade de corrente eléctrica paralela a  $z$ , através da área unitária [perpendicular ao eixo dos  $zz$ ]” [Maxwell. 1861-2, pág.462]. Para as outras componentes da corrente eléctrica temos, por analogia:<sup>66</sup>

onde  $\vec{e}_\theta$  é um vector unitário tangente à curva que delimita a superfície  $S$ ,  $\vec{N}$  é um vector unitário normal à superfície  $S$  cujo sentido está relacionado com o sentido de  $\vec{e}_\theta$  por meio da regra da mão direita e “ $\nabla \times$ ” é o operador rotacional.

<sup>64</sup> Em notação vectorial temos:

$$W = \oint \vec{H} \cdot \vec{e}_\theta d\theta$$

onde  $W$  é o trabalho da força que actua sobre o pólo norte do íman ao longo do caminho percorrido pelo íman,  $\vec{H}$  é o vector intensidade da força magnética e  $\vec{e}_\theta$  é o vector unitário tangente à curva e cujo sentido é o sentido em que a curva é percorrida.

Pelo teorema de Stokes,

$$W = \iint (\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{N} dS$$

onde  $\nabla \times \vec{H}$  é o rotacional do vector intensidade da força magnética e  $\vec{N}$  é o vector unitário normal à superfície delimitada pela curva e cujo sentido se relaciona com o sentido em que a curva é percorrida recorrendo à regra da mão direita.

Tendo em conta o percurso do íman indicado por Maxwell (o íman percorreria uma curva que delimita uma superfície unitária paralela ao plano  $xy$ ),  $dS = dxdy$ ,  $\vec{N}$  é o vector unitário do eixo dos  $zz$  e, consequentemente,  $(\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{N}$  é a componente do rotacional do vector intensidade da força magnética segundo o eixo dos  $zz$ . Como  $\vec{H} = (\alpha, \beta, \gamma)$ ,  $(\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{N} = \left( \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right)$  e, portanto,  $W = \iint (\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{N} dS = \iint \left( \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) dxdy$ . Consequentemente,  $\left( \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right)$  é o trabalho por unidade de área. Mais precisamente, pelo teorema do valor médio, existe um ponto sobre a superfície delimitada pela curva percorrida pelo íman, onde  $W = A \left( \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right)$ , sendo  $A$  a área da superfície percorrida. Visto que Maxwell referiu que a área da superfície seria igual a 1, em algum ponto da superfície temos  $W = \left( \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right)$ .

<sup>65</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 462

<sup>66</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 462

$$\frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\gamma}{dy} - \frac{\partial\beta}{\partial z} \right) = p; \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \right) = q; \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \right) = r$$

onde  $p, q, r$  são, respectivamente, a quantidade de corrente eléctrica que atravessa a unidade de área perpendicular a  $x, y, z$ .<sup>67</sup> Esta é a lei de Ampère em unidades electromagnéticas.

Desta forma,

$$X_3 = -\mu\beta \frac{1}{4\pi} \left( \frac{\partial\beta}{\partial x} - \frac{\partial\alpha}{\partial y} \right) = -\mu\beta r$$

ou seja, como nota Maxwell, **a força que actua segundo  $x$  sobre uma corrente segundo  $z$  tem intensidade igual ao produto da indução magnética segundo  $y$  pela quantidade de corrente segundo  $z$ .**

Analogamente, a quarta parcela de  $X$  é dada por:

$$X_4 = \mu\gamma \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} \right) = \mu\gamma q$$

e significa que **a força segundo  $x$  que actua numa corrente segundo  $y$  tem intensidade igual ao produto da força de indução magnética segundo  $z$  pela quantidade de corrente segundo  $y$ .**

Somando todas as contribuições que temos estado a explicitar para a componente da força segundo o eixo dos  $xx$ , e, por analogia, escrevendo também as componentes da força segundo os eixos dos  $yy$  e dos  $zz$ , Maxwell concluiu que a força que actua num elemento do éter é dada por

$$\left. \begin{aligned} X &= \alpha m + \frac{1}{8\pi} \mu \frac{d}{dx} (H^2) - \mu\beta r + \mu\gamma q - \frac{dp_1}{dx} \\ Y &= \beta m + \frac{1}{8\pi} \mu \frac{d}{dy} (H^2) - \mu\gamma p + \mu\alpha r - \frac{dp_1}{dy} \\ Z &= \alpha m + \frac{1}{8\pi} \mu \frac{d}{dz} (H^2) - \mu\alpha q + \mu\beta p - \frac{dp_1}{dz} \end{aligned} \right\}$$

onde  $\alpha, \beta, \gamma$  são as componentes do vector intensidade da força magnética, que actua num pólo unitário norte no vazio,  $\mu$  é a capacidade de indução magnética,

---

<sup>67</sup> Estas equações, em notação vectorial, são equivalentes a  $\frac{1}{4\pi} \nabla \times \vec{H} = \vec{J}$  onde  $\vec{H}$  é o vector intensidade da força magnética e  $\vec{J} = (p, q, r)$  é o vector densidade de corrente eléctrica. A diferença entre esta equação e a Lei de Ampère escrita neste artigo deve-se a uma alteração no sistema de unidades que Maxwell usa num artigo e noutro.

$q, p, r$  são, respectivamente, a quantidade de corrente eléctrica que atravessa a unidade de área perpendicular a  $x, y, z$  e  $p_1$  é a pressão do éter.<sup>68</sup>

Maxwell nota que o primeiro termo de cada equação nos dá a força que actua no pólo norte de um íman de força  $m$  (colocado no vazio ou no ar, acrescento eu), o segundo termo de cada equação dá-nos a força que actua nos materiais capazes de magnetismo por indução (como eu lhe chamei, força que actua nos materiais linearmente magnetizados), o quarto e quinto termos representam a força sobre correntes eléctricas e o sexto termo representa a força resultante da pressão do éter.

De notar que os quarto e quinto termos indicam que a força magnética que actua numa corrente eléctrica é dada por:

$$\left. \begin{aligned} X_{3;4} &= -\mu\beta r + \mu\gamma q \\ Y_{3;4} &= -\mu\gamma p + \mu\alpha r \\ Z_{3;4} &= -\mu\alpha q + \mu\beta p \end{aligned} \right\}$$

onde  $X_{3;4}, Y_{3;4}, Z_{3;4}$  são as componentes da força magnética sobre uma corrente eléctrica segundo  $x, y, z$ ;  $\mu$  é a capacidade indutiva específica;  $\alpha, \beta, \gamma$  são as componentes do vector intensidade da força magnética, que é a força magnética que actua num pólo unitário norte no vazio, segundo  $x, y, z$ ; e  $p, q, r$  são as componentes da corrente eléctrica, segundo  $x, y, z$ .<sup>69</sup> **Esta equação significa que a força magnética que actua sobre uma corrente eléctrica tem intensidade igual ao produto da quantidade de corrente eléctrica pela componente da indução magnética perpendicular à corrente; direcção perpendicular quer às linhas de força magnética quer à direcção da corrente; e sentido dado pela regra da mão direita com os dedos da mão direita fazendo o movimento que vai da linha de força magnética para o eixo da corrente.**

Na segunda parte do modelo, Maxwell introduz entre os vórtices partículas eléctricas cujo movimento constitui as correntes eléctricas.

<sup>68</sup> Em notação vectorial estas equações escrevem-se:

$$\vec{F} = m\vec{H} + \frac{\mu}{8\pi} \nabla \cdot (\vec{H}^2) - \mu(\vec{H} \times \vec{J}) - \nabla \cdot p_1$$

onde  $\vec{F}$  é a força que actua sobre um elemento do éter,  $m$  é a quantidade de matéria magnética por unidade de volume,  $\vec{H}$  é o vector intensidade da força magnética,  $\mu$  é a capacidade de indução magnética,  $\vec{J}$  é o vector densidade de corrente eléctrica,  $p_1$  a pressão hidrostática.

<sup>69</sup> Estas equações são equivalentes, em notação vectorial, à equação:

$$\vec{F}_{3;4} = -\mu\vec{H} \times \vec{J}$$

onde  $\vec{F}_{3;4}$  é a força magnética sobre a corrente eléctrica,  $\vec{H}$  é o vector intensidade da força magnética e  $\vec{J}$  é o vector densidade de corrente eléctrica.

O primeiro cálculo de Maxwell a partir deste modelo é saber qual a relação entre o movimento dos vórtices e o movimento das partículas eléctricas. Usando conhecimentos de mecânica newtoniana, e considerando a correspondência entre grandezas mecânicas e grandezas electromagnéticas, exposta na secção anterior, Maxwell deduz novamente a lei de Ampère que havia usado na primeira parte do modelo.

Depois Maxwell calcula a energia por unidade de volume associada aos vórtices, chegando à conclusão de que esta é dada por:<sup>70</sup>

$$\frac{1}{8\pi}\mu(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)$$

onde  $\mu$  é a capacidade indutiva específica e  $(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)$  é o quadrado da intensidade do campo, a qual é o módulo do vector  $(\alpha, \beta, \gamma)$  designado por vector intensidade da força magnética. Por sua vez, este último é a força que actua num pólo unitário norte, no vazio ou ar.

Para chegar a este resultado, Maxwell começa por notar que a energia deve ser proporcional ao produto da densidade dos vórtices pelo quadrado da velocidade linear na periferia desses mesmos vórtices, e, conseqüentemente, de acordo com a analogia estabelecida neste modelo do éter, ao produto da capacidade indutiva magnética pelo quadrado da intensidade do campo. Depois calcula a constante de proporcionalidade quando o vector intensidade da força magnética é o gradiente de um potencial, ou seja, quando o rotacional do vector intensidade da força magnética é nulo. Neste caso não podem existir, nem correntes eléctricas, nem correntes de deslocamento. O valor encontrado é depois considerado válido para quaisquer valores do vector intensidade da força magnética, inclusive para os casos em que o rotacional do vector intensidade da força magnética não é nulo, ou seja, em que já existem correntes, quaisquer que elas sejam.

Em seguida, Maxwell calcula o trabalho, por unidade de tempo, realizado pela força correspondente à “reacção de [cada] partícula [eléctrica] nos vórtices” [Maxwell, 1861-2, pág. 474], no caso em que o centro dos vórtices está em repouso e não há deformação dos mesmos. Este trabalho está relacionado com a força (eléctrica) que

---

<sup>70</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 474

actua nas partículas (eléctricas), pois esta é a única responsável pelo movimento das partículas e, consequente, pela acção destas sobre os vórtices.

Finalmente, Maxwell iguala o trabalho realizado, por unidade de tempo, sobre os vórtices à variação da energia dos vórtices no mesmo intervalo de tempo, calculada em função do vector intensidade da força magnética. Tendo em conta que o trabalho sobre os vórtices está relacionado com a força (eléctrica) que actua nas partículas (eléctricas), Maxwell obtém a relação entre as forças (eléctricas) exercidas sobre as partículas (eléctricas) e o vector intensidade da força magnética, chegando à seguinte equação:<sup>71</sup>

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} &= \mu \frac{d\alpha}{dt} \\ \frac{dR}{dx} - \frac{dP}{dz} &= \mu \frac{d\beta}{dt} \\ \frac{dP}{dy} - \frac{dQ}{dx} &= \mu \frac{d\gamma}{dt} \end{aligned} \right\}$$

onde  $P, Q, R$  são “as forças que actuam na unidade de partículas [eléctricas]” [Maxwell, 1861-2, pág. 474], isto é, a força que actua em cada partícula eléctrica, ou como modernamente dizemos, por unidade de carga;  $\mu$  é a capacidade de indução magnética e  $\alpha, \beta, \gamma$  são as componentes do vector intensidade da força magnética.<sup>72</sup>

**Esta é a chamada lei de Faraday** que nos dá a força eléctrica, por unidade de carga, devida à variação no tempo do produto do vector intensidade da força magnética pela capacidade de indução magnética, ou seja, recordando que a indução magnética é o produto da capacidade de indução magnética pelo vector intensidade da força magnética, **é a equação que nos dá a força eléctrica por unidade de carga devida à variação no tempo da indução magnética. Esta equação significa que a variação no tempo da indução magnética gera uma força electromotriz perpendicular à direcção em que se deslocam as linhas de força magnética cujo módulo é proporcional à taxa de variação no tempo da indução magnética. Para o caso da força eléctrica induzida num circuito, a equação diz-nos que esta é proporcional ao simétrico da variação no**

<sup>71</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 475

<sup>72</sup> Na notação vectorial estas equações escrevem-se:

$$-\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

onde  $\vec{E} = (P, Q, R)$  é a força eléctrica por unidade de carga,  $\vec{B} = \mu (\alpha, \beta, \gamma)$  é a indução magnética ou o produto da capacidade indutiva específica pelo vector intensidade da força magnética e “ $\nabla \times$ ” é o operador rotacional.



**tempo do número de linhas de força magnética que atravessam a área delimitada pelo circuito.**

De notar que o número de linhas de força magnética que atravessam a área delimitada pelo circuito não é o mesmo que o número de linhas de força que o circuito intercepta no seu movimento, como se pode ver no caso de o circuito estar paralelo às linhas de força e as interceptar no seu movimento. Neste caso, como Faraday mostrou, haverá uma corrente induzida. Corrente cuja existência não é prevista por esta equação.

Maxwell afirma, em seguida, que as equações anteriores podem ser postas na forma:<sup>73</sup>

$$P = \frac{dF}{dt}; Q = \frac{dG}{dt}; R = \frac{dH}{dt}$$

onde  $F, G, H$  são dados pelas equações:

$$\begin{aligned}\frac{dG}{dz} - \frac{dH}{dy} &= \mu\alpha \\ \frac{dH}{dx} - \frac{dF}{dz} &= \mu\beta \\ \frac{dF}{dy} - \frac{dG}{dx} &= \mu\gamma\end{aligned}$$

com as condições:

$$\begin{aligned}\frac{1}{4\pi} \left( \frac{d}{dx} \mu\alpha + \frac{d}{dy} \mu\beta + \frac{d}{dz} \mu\gamma \right) &= m = 0 \\ \frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} &= 0\end{aligned}$$

onde  $m$  é, como antes, “a quantidade de matéria magnética que aponta para norte, por unidade de volume” [Maxwell, 1861-2, pág. 459] e o vector  $(F, G, H)$  é o vector que, tal como no primeiro artigo, representa o estado electrotónico de Faraday.<sup>74</sup>

De notar que, contrariamente ao que acontecia no primeiro artigo, o vector que representa o estado electrotónico está agora completamente definido. De

---

<sup>73</sup> Maxwell, 1861-2, pág., 476

<sup>74</sup> Em notação vectorial e fazendo  $\vec{A} = (F, G, H)$  e  $\vec{B} = \mu(\alpha, \beta, \gamma)$  temos:

$$\begin{aligned}-\nabla \times \vec{A} &= \vec{B} \\ \frac{1}{4\pi} \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$

facto, a primeira e terceira equações acima enunciadas indicam que, neste artigo, o vector que representa o estado electrotónico é o vector cujo rotacional é o simétrico da indução magnética e cuja divergência é nula.

Para que este vector possa existir a divergência da indução magnética tem de ser nula. Isto é o que indica a segunda equação acima enunciada. Esta equação é comumente designada por **“lei de Gauss para o magnetismo”**. Ela significa que **não existem pólos magnéticos isolados**, e que **as linhas de força magnética são fechadas**.

Até aqui, Maxwell considerou, como dissemos, que os centros dos vórtices não se moviam e que os vórtices não se deformavam. No entanto, o movimento da matéria, sendo esta constituída por éter e, portanto, por vórtices desse éter, provoca a deslocação e deformação dos referidos vórtices. Esta deslocação e deformação dos vórtices causa, segundo nos diz Maxwell, uma variação na sua velocidade (de rotação)<sup>75</sup>. Por sua vez, esta variação da velocidade (de rotação) dos vórtices devida ao movimento da matéria, gera, sobre esta, como iremos ver, uma componente da força electromotriz relacionada com o seu movimento: a força electromotriz induzida num corpo em movimento.

Com efeito, na proposição XI do artigo, Maxwell propõe-se a “determinar as forças electromotrices num corpo em movimento” [Maxwell, 1861-2, pág.481]. O seu ponto de partida é que a variação no tempo da velocidade (de rotação)<sup>76</sup> dos vórtices, proporcional, no seu modelo, à variação da indução magnética, tem duas componentes:

- a) uma componente relacionada com a força electromotriz segundo a lei de Faraday, anteriormente deduzida;
- b) outra componente relacionada com a mudança da forma dos vórtices sem que estes variem em volume.

A relação entre a variação no tempo da componente da velocidade de rotação dos vórtices segundo  $x$  e a deformação dos mesmos sem alteração do seu volume é dada por uma equação que Maxwell determina através de conhecimentos de mecânica. O

---

<sup>75</sup> Maxwell não acrescenta “de rotação”. No entanto é evidente que se está aqui a referir à velocidade associada com a rotação, a qual note-se, é neste artigo sempre medida pelo produto da velocidade angular pelo raio dos vórtices, pois é em módulo igual à velocidade linear das particular na periferia do vórtice, medida em relação ao seu centro, e a velocidade na periferia dos vórtices é, em módulo, igual ao produto da velocidade angular dos vórtices pelo raio dos mesmos.

<sup>76</sup> Ver nota de rodapé anterior

mesmo sucede com a relação entre a variação no tempo das outras componentes da velocidade de rotação e a deformação dos vórtices.

Partindo das equações que relacionam a variação no tempo da velocidade de rotação dos vórtices com a sua deformação e da lei de Faraday tomada como a forma de determinar a variação no tempo da velocidade de rotação dos vórtices devida à força electromotriz, e recorrendo ainda à equação válida para um fluido incompressível:<sup>77</sup>

$$\frac{d}{dx} \frac{dx}{dt} + \frac{d}{dy} \frac{dy}{dt} + \frac{d}{dz} \frac{dz}{dt} = 0$$

e à equação para a indução magnética na ausência de “magnetismo livre” (lei de Gauss para o magnetismo)<sup>78</sup>:

$$\frac{d\alpha}{dx} + \frac{d\beta}{dy} + \frac{d\gamma}{dz} = 0$$

Maxwell chegou a um sistema de equações cuja solução, para a força electromotriz sobre um corpo em movimento, é a seguinte<sup>79</sup>

$$\left. \begin{aligned} P &= \mu\gamma \frac{dy}{dt} - \mu\beta \frac{dz}{dt} + \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx} \\ Q &= \mu\alpha \frac{dz}{dt} - \mu\gamma \frac{dx}{dt} + \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy} \\ R &= \mu\beta \frac{dx}{dt} - \mu\alpha \frac{dy}{dt} + \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz} \end{aligned} \right\}$$

onde  $P, Q, R$  são as componentes da força electromotriz;  $\mu$  é a capacidade de indução magnética;  $\mu\alpha, \mu\beta, \mu\gamma$  são as componentes da indução magnética;  $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}$  são as componentes da velocidade do corpo;  $F, G, H$  são as componentes do vector que representa o estado electrotónico; e  $\psi$  é uma função a ser determinada “em qualquer caso ... pelas circunstâncias do problema” e cuja “interpretação física ... é que esta é a tensão eléctrica em cada ponto do espaço”. [Maxwell, 1861-2, pág. 482]<sup>80</sup>

<sup>77</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 481

<sup>78</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 482

<sup>79</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 482

<sup>80</sup> Fazendo  $\vec{E} = (P, Q, R)$ ,  $\vec{V} = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}\right)$ ,  $\vec{B} = (\mu\alpha, \mu\beta, \mu\gamma)$ ,  $\vec{A} = (F, G, H)$  as equações anteriores escrevem-se, em linguagem vectorial:

$$\vec{E} = -\vec{B} \times \vec{V} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \psi$$

onde  $\vec{B} \times \vec{V}$  é o produto vectorial da indução magnética pela velocidade do corpo,  $\vec{A}$  representa o estado electrotónico e  $\nabla \psi$  é o gradiente do potencial electroestático.

**Os primeiros dois termos de cada uma das anteriores equações representam “o efeito do movimento de qualquer corpo no campo magnético” [Maxwell, 1861-2, pág. 482]. Este efeito consiste no surgimento de uma força electromotriz perpendicular quer à trajectória do corpo quer às linhas de força magnética e é proporcional, em módulo, à intensidade da indução magnética e à componente da velocidade perpendicular às linhas de força. A terceira parcela de cada equação é a já discutida força electromotriz devida à variação no tempo da indução magnética. E a quarta parcela é a força electromotriz devida a diferentes tensões eléctricas em diferentes pontos do espaço. Esta aponta no sentido em que a tensão electrostática diminui e é, em módulo, proporcional à diferença tensão entre dois pontos do espaço.**

Até aqui Maxwell já indicou expressões para a força magnética sobre os ímanes, sobre as correntes e sobre os materiais paramagnéticos e diamagnéticos. Indicou também expressões para a força magnética produzida por ímanes e por correntes e para a força electromotriz produzida pela variação no tempo da indução magnética, pelo movimento dos corpos no campo magnético. A variação no espaço da tensão eléctrica foi relacionada com a força electromotriz mas não foi explicada no contexto do modelo nem foi explicada a sua relação com a condição dos corpos electrizados, nem o seu efeito sobre os condutores e dieléctricos. Na terceira parte do modelo Maxwell trata precisamente destes aspectos.

Maxwell começa por identificar a tensão eléctrica com a “pressão que as partículas eléctricas exercem umas sobre as outras” [Maxwell, 1861-2, pág. 490] Depois nota que a força electromotriz, quando aplicada a condutores, gera correntes eléctricas proporcionais à força electromotriz e à condutibilidade do meio. Quando aplicada aos dieléctricos causaria nestes um deslocamento da electricidade em relação à sua posição de equilíbrio, isto é, ao estado não polarizado do dieléctrico, deixando as moléculas do dieléctrico polarizadas. Esse deslocamento eléctrico seria proporcional à força electromotriz, segundo a equação:<sup>81</sup>

$$R = -4\pi E^2 h$$

---

<sup>81</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 491

onde  $R$  seria a força electromotriz,  $h$  o deslocamento e  $E$  um coeficiente dependente da natureza do dieléctrico.<sup>82</sup>

Esta equação também se pode por na forma:

$$h = -\frac{1}{4\pi E^2} R = -\varepsilon \cdot R$$

onde

$$\varepsilon = \frac{1}{4\pi E^2}$$

é o que hoje designamos por **permitividade eléctrica do meio**. Esta relaciona-se com a capacidade indutiva específica de Faraday por meio da equação:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

onde  $\varepsilon_0$  é uma constante designada por permitividade eléctrica do vazio e  $\varepsilon_r$  é a capacidade indutiva específica de Faraday.

A variação no tempo do deslocamento eléctrico  $h$  causaria uma corrente de deslocamento  $r$  dada por:<sup>83</sup>

$$r = \frac{dh}{dt}$$

Vendo “a força electromotriz produzir deslocamento eléctrico e ... o dieléctrico recuperar deste estado de deslocamento eléctrico com uma força electromotriz igual” [Maxwell, 1861-2, pág. 491] percebe-se a semelhança entre o fenómeno da polarização eléctrica e o fenómeno da elasticidade linear em que o corpo “cede à pressão e recupera a sua forma quando a pressão é removida” [Maxwell, 1861-2, pág. 492]. Com base nesta analogia e na conservação da energia Maxwell calcula que, se as partículas eléctricas puderem ser consideradas sólidos perfeitos:<sup>84</sup>

$$E^2 = \pi m$$

onde  $m$  é o coeficiente de rigidez do meio e sólidos perfeitos, são sólidos em que o coeficiente de rigidez se relaciona com a elasticidade cúbica por meio da equação:

$$\frac{\epsilon}{m} = \frac{5}{6}$$

onde  $\epsilon$  é a elasticidade cúbica.

---

<sup>82</sup> Note-se que esta equação também se pode escrever, em notação vectorial

$$\vec{h} = -\frac{1}{4\pi E^2} \vec{R}$$

<sup>83</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 491

<sup>84</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 495

Depois de apresentar estas relações, Maxwell trata de corrigir a lei de Ampère de modo a dar conta da corrente de deslocamento. Escreveu então:<sup>85</sup>

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} - \frac{1}{E^2} \frac{dP}{dt} \right) \\ q &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\alpha}{dy} - \frac{d\beta}{dx} - \frac{1}{E^2} \frac{dQ}{dt} \right) \\ r &= \frac{1}{4\pi} \left( \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} - \frac{1}{E^2} \frac{dR}{dt} \right) \end{aligned} \right\}$$

onde  $p, q, r$  seriam as correntes,  $\alpha, \beta, \gamma$  seriam as componentes do vector intensidade da força magnética,  $P, Q, R$  seriam as componentes da força electromotriz e  $E^2$  seria proporcional ao coeficiente de rigidez do meio.<sup>86</sup> **Esta equação significa que as correntes eléctricas quer as correntes de deslocamento geram linhas de força magnética perpendiculares a estas que formam círculos em torno destas e têm sentido dado pela regra da mão direita como exposta na anterior explicação da lei de Ampère.**

Continuando, Maxwell nota que de acordo com a já conhecida equação da continuidade<sup>87</sup>:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} - \frac{de}{dt} = 0$$

onde  $e$  é a quantidade de electricidade livre por unidade de volume.<sup>88</sup> **Esta equação significa que as correntes que entram num dado volume delimitado por uma superfície fechada menos as correntes que saem desse volume é igual ao aumento no tempo da carga no interior desse volume.**

Derivando em ordem ao tempo a equação de Ampère corrigida e substituindo na equação da continuidade, obtemos, integrando novamente no tempo:<sup>89</sup>

---

<sup>85</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 496

<sup>86</sup> Em notação vectorial, fazendo  $\vec{H} = (\alpha, \beta, \gamma)$ ,  $\vec{J} = (p, q, r)$  e  $\vec{D} = -\frac{1}{4\pi E^2} (P, Q, R)$  a equação anterior é equivalente a

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi \left( \vec{J} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)$$

Note-se que o vector deslocamento eléctrico definido por Maxwell e aqui representado por  $\vec{D}$  é simétrico do vector deslocamento eléctrico actual. Daí o sinal de “-” que não aparece na actual lei de Ampère-Maxwell

<sup>87</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 496

<sup>88</sup> Em notação vectorial, fazendo  $\vec{J} = (p, q, r)$  esta equação escreve-se:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \frac{de}{dt}$$

<sup>89</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 497

$$e = \frac{1}{4\pi E^2} \left( \frac{dP}{dx} + \frac{dQ}{dy} + \frac{dR}{dz} \right)^{90}$$

Esta é a equação de Gauss para a electroestática. **Esta equação significa que o número de linhas de força eléctrica que sai de um volume delimitado por uma certa superfície fechada menos o número de linhas de força magnética que entra nesse volume é igual à carga magnética no interior do volume.**

Com esta equação e a anterior equação para o deslocamento eléctrico, Maxwell tem tudo o que precisa para descrever os fenómenos electrostáticos e fica assim completo o seu estudo dos fenómenos electromagnéticos conhecidos.

Em resumo as equações fundamentais da teoria electromagnética de Maxwell são:

- A definição de indução magnética:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

onde  $\vec{H}$  é a força que actua num pólo magnético unitário norte, no vazio

- As quatro equações que deram origem às equações conhecidas por equações de Maxwell:

- Definição do vector estado electrotónico e lei de Gauss para o magnetismo:

$$-\nabla \times \vec{A} = \mu \vec{H} \Rightarrow \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

- Lei de Gauss para a electroestática:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi E^2 e \Leftrightarrow \nabla \cdot \vec{D} = e$$

- Equação para a força electromotriz:

$$\vec{E} = \frac{d\vec{A}}{dt} - \mu \vec{H} \times \vec{V} - \nabla \cdot \psi$$

- Lei de Ampère-Maxwell

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi \vec{j} - \frac{d\vec{D}}{dt}$$

- A equação que define o deslocamento eléctrico:

$$\vec{D} = -\frac{1}{4\pi E^2} \vec{E} = -\varepsilon \vec{E}$$

---

<sup>90</sup> Esta equação escreve-se:

$$e = \frac{1}{4\pi E^2} \nabla \cdot \vec{E} \text{ onde } \vec{E} = (Q, P, R)$$

- A equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{de}{dt}$$

- As leis para a força eléctrica e para a força magnética:

- Força eléctrica sobre uma carga  $Q$ :

$$\vec{F}_{el} = Q \cdot \vec{E}$$

- Força magnética sobre um pólo magnético de força  $m$ , no vazio:

$$\vec{F}_m = m \cdot \vec{H}$$

- Força magnética sobre materiais diamagnéticos ou paramagnéticos:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{8\pi} \mu \nabla \cdot \vec{H}^2$$

- Força magnética sobre correntes:

$$\vec{F}_m = -\mu \vec{H} \times \vec{J}$$

### 7.2.3 Ondas electromagnéticas

Para além de lhe permitir deduzir equações para o electromagnetismo, o modelo do éter acima referido permitiu a Maxwell propor a unificação da luz com o electromagnetismo, pois admite a existência de ondas mecânicas transversais, tal como já tinham sido concebidas em óptica.

Com efeito, sabia-se na altura, que a velocidade das ondas mecânicas transversais podia ser calculada a partir da densidade mássica volúmica e da rigidez do meio em que as ondas se propagam. Maxwell tinha, portanto de determinar a densidade mássica do meio e a sua rigidez.

Quanto à rigidez, Maxwell considerou que os vórtices não teriam qualquer rigidez (ou rigidez desprezável), ao passo que as partículas eléctricas teriam rigidez dada por, como vimos:

$$E^2 = \pi m \Leftrightarrow m = \frac{E^2}{\pi}$$

onde  $m$  é a rigidez.



Quanto à densidade, Maxwell despreza a das partículas eléctricas e escreve para a dos vórtices:<sup>91</sup>

$$\mu = \pi\rho \Leftrightarrow \rho = \frac{\mu}{\pi}$$

onde  $\rho$  é a densidade do éter e  $\mu$  a capacidade indutiva específica do meio.

Nestas condições, o meio admitiria ondas electromagnéticas mecânicas transversais com velocidade dada por:<sup>92</sup>

$$v = \sqrt{\frac{m}{\rho}} = \sqrt{\frac{E^2}{\mu}}$$

Recordando que no ar e no vazio  $\mu=1$  verificamos que, no vácuo ou ar,  $E$  é a velocidade das ondas electromagnéticas.<sup>93</sup>

A equação anterior também se pode por na forma:

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon\mu}}$$

onde  $\epsilon = \frac{1}{4\pi E^2}$  é a **primitividade eléctrica do meio** e  $\mu$  é a condutibilidade magnética, também designada por **permitividade magnética**.

**Desta forma o meio admitiria ondas mecânicas transversais com velocidade inversamente proporcional à raiz quadrada do produto da permeabilidade eléctrica pela permeabilidade magnética.**

**Considerando que a permeabilidade eléctrica e magnética do vácuo igual à do ar, onde a luz tem a mesma velocidade que no vácuo, verificou-se que a velocidade das ondas transversais neste modelo do éter é, para o ar ou vácuo, igual à velocidade da luz conhecida. Por outras palavras verificou-se que no ar ou vácuo  $E = c$ , onde  $c$  é a, já conhecida, velocidade da luz no vácuo e  $E$  é a velocidade das ondas electromagnética no vazio, calculada a partir da permitividade eléctrica do ar. Esta última foi determinada por meio de uma experiência realizada por Weber em que se mediu a razão entre a permitividade eléctrica do ar e a respectiva permeabilidade magnética. Escolhendo para o vácuo  $\mu = 1$ , a razão entre as duas grandezas referidas é igual à permitividade eléctrica do ar ou vazio. A igualdade entre a**

<sup>91</sup> Maxwell, 1861-2, pág.499

<sup>92</sup> Maxwell, 1861-2, pág. 499

<sup>93</sup> Note-se que  $E$  só é igual à velocidade das ondas electromagnéticas quando se considera o valor deste no ar ou vácuo. Noutros meios  $E$  é diferente da velocidade da luz no vácuo.

velocidade da luz no vácuo e ar e a razão entre a permitividade eléctrica e magnética do ar, constituiu um forte argumento para a identificação das ondas electromagnéticas previstas por Maxwell com ondas de luz conjecturadas na óptica.

### 7.3 Nova dedução das equações e das ondas electromagnéticas transversais: o artigo “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”

Depois de ter deduzido as suas equações partindo do modelo do éter acima referido e de ter previsto a existência, nesse meio, de ondas mecânicas transversais que se propagariam à velocidade da luz, Maxwell resolveu abandonar o modelo e deduzir as suas equações directamente de resultados experimentais.

Isto porque, não sendo o modelo do éter uma hipótese concreta acerca do éter, não havia obrigação das suas conclusões, em particular, a da igualdade entre a velocidade das ondas mecânicas e a velocidade da luz, corresponderem a alguma verdade.

Para resolver este problema, Maxwell escreveu, então, outro artigo, intitulado “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, onde tratou de deduzir, as suas equações, conforme nota no final do artigo, partindo de três tipos de resultados experimentais:

1. “A indução de correntes eléctricas ... de acordo com a variação das linhas de força que passam através do circuito”, ou seja, de acordo com a lei da indução electromagnética, enunciada por Faraday e expressa em termos matemáticos por Maxwell;
2. “A distribuição da intensidade magnética de acordo com a variação de um potencial magnético”, isto é, a distribuição da intensidade magnética de acordo com a lei Ampère, na forma macroscópica;

3. “A indução (ou influência) da electricidade estática sobre dieléctricos”, e, embora Maxwell não o diga, outras equações já conhecidas, nomeadamente as da electroestática; [Maxwell, 1865, (75)]<sup>94</sup>

A estes resultados Maxwell juntou as seguintes definições:

- A definição de corrente eléctrica como “a transmissão de electricidade de uma parte de um corpo para outra” [Maxwell, 1865, (54)];
- A definição de deslocamento eléctrico como “a electrificação oposta de lados opostos de uma molécula ou partícula de um corpo” [Maxwell, 1865, (55)] ;
- A definição de “corrente total” como a soma, em cada ponto do espaço, da corrente eléctrica com a derivada do deslocamento eléctrico, a chamada corrente de deslocamento, de forma a obter “o movimento total da electricidade” [Ibidem];
- A definição de “força electromotriz” (que corresponde, em linguagem moderna, ao campo eléctrico) num dado ponto do espaço, como a “diferença de potencial por unidade de comprimento num condutor colocado... [no referido] ponto do espaço” [Maxwell, 1865, (56)] e alinhado, para determinação de cada uma das componentes da “força” com cada uma das direcções x,y,z, ou seja, é a diferença de potencial aos bordos de um condutor com uma unidade de comprimento, alinhado para determinação de cada uma das componentes do vector campo eléctrico com cada uma das três direcções espaciais;
- A definição de “momento magnético”, associado a um ponto do espaço, como a variação da força electromotriz que seria produzida, nesse ponto do espaço, se se removessem as fontes de campo magnético;
- A definição de “força magnética” (que corresponde, em linguagem moderna, ao campo magnético  $\vec{H}$ ) num dado ponto do espaço, como a força que actua num pólo magnético unitário do tipo norte colocado nesse ponto do espaço, acrescento eu, no vazio;

---

<sup>94</sup> Isto significa: Maxwell, 1865, parágrafo 75. Daqui por diante será usada a mesma notação para outros parágrafos do mesmo artigo.

- A definição de “coeficiente de indução magnética”, ou permeabilidade magnética, como “a proporção da indução magnética num dado meio em relação à mesma no ar por acção de igual força magnetizadora”, isto é, de acordo com a definição anterior, igual “força magnética” [Maxwell, 1865, (60)].

Com estas definições, a lei de Faraday, a lei de Ampère, os factos conhecidos da electrostática, e a sua inovadora noção de corrente de deslocamento, Maxwell, efectivamente deduziu, de novo, as suas equações, sem recorrer a qualquer modelo do éter.

Com efeito a partir da lei de Faraday e da definição de momento magnético Maxwell deduziu a equação de Gauss para o magnetismo ( $\nabla \times \vec{A} = \mu \vec{H} \Rightarrow \nabla \cdot \mu \vec{H} = 0$ )<sup>95</sup>.

Depois, a partir da lei de Ampère na forma por si deduzida e substituindo a corrente eléctrica pela corrente total, Maxwell deduziu a contribuição, para o campo magnético, das correntes eléctricas e da corrente de deslocamento ( $\nabla \times \vec{H} = 4\pi(\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt})$ )<sup>96</sup>.

De seguida, partindo novamente da lei de Faraday, e usando o conceito de momento magnético, deduziu a contribuição, para a força electromotriz, da variação da intensidade e/ou da disposição das fontes de campo magnético ( $\vec{E} = -\frac{d\vec{A}}{dt}$ ) e a contribuição das cargas eléctricas ( $\vec{E} = -\nabla \cdot \phi$ ) onde  $\phi$  é o potencial electrostático, ainda por determinar.

Considerando que a variação do momento magnético sobre um condutor em movimento causaria neste uma força electromotriz induzida, dada pela mesma fórmula que dá a força electromotriz devida à variação da intensidade e/ou da posição das fontes de campo magnético, Maxwell deduziu a contribuição do movimento de um condutor para a força electromotriz ( $\vec{E} = \mu \vec{V} \times \vec{H}$ ).

---

<sup>95</sup> Note-se que o “momento magnético” é o simétrico do vector que Maxwell escolheu no artigo anterior para representar o estado electrotónico de Faraday. Este é o actual potencial vector do campo de indução magnética  $\vec{B}$ . A partir de agora  $\vec{A}$  representa o vector “momento magnético” definido por Maxwell neste artigo. Note-se também que a notação vectorial não existia no tempo de Maxwell pelo que as equações que aqui apresento são equações equivalentes às de Maxwell colocadas na forma vectorial.

<sup>96</sup> Note-se que neste artigo Maxwell definiu o deslocamento eléctrico da forma que o definimos actualmente e que é o simétrico do deslocamento definido por Maxwell no artigo anterior. A partir de agora  $\vec{D}$  representa o actual vector deslocamento eléctrico.

Juntando as três contribuições Maxwell fica, novamente, com a equação da força electromotriz induzida.

Recordando a teoria de Thomson e Faraday sobre a polarização de um dieléctrico e assumindo a linearidade da polarização, Maxwell escreve a equação que relaciona o deslocamento eléctrico com a força electromotriz ( $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$  onde  $\varepsilon$  é a permeabilidade eléctrica do meio).

Finalmente, para determinar a relação entre a força electromotriz e a carga eléctrica, equação que permite depois obter o potencial eléctrico, Maxwell argumenta que a carga eléctrica “resulta da electrificação de diferentes partes do campo não se neutralizando umas às outras” [Maxwell, 1865, (68)] e retira daí a lei de Gauss para o campo eléctrico ( $\nabla \cdot \vec{D} = e$ ).

**Maxwell fica assim novamente com as suas quatro equações para o campo electromagnético.**

Maxwell escreve também a equação da continuidade e a equação que relaciona a força electromotriz com a corrente eléctrica (Lei de Ohm), tomando-as, naturalmente, como dados adquiridos.

Além disso, Maxwell deduz novamente as equações para as forças eléctrica e magnética sobre cargas eléctricas, sobre cargas magnéticas e sobre correntes eléctricas.

Depois disto, Maxwell trata de mostrar que as equações para o campo electromagnético implicam, na ausência de condutores e correntes, a descrição do campo eléctrico e do campo magnético por equações de onda em que figura uma velocidade de propagação igual à anteriormente deduzida ( $v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon\mu}}$ ). Por outras palavras, **Maxwell mostrou que as suas equações previam a existência de ondas electromagnéticas que, no vácuo, se propagariam à velocidade da luz.** Maxwell mostrou também que estas ondas seriam transversais e desenvolveu uma teoria da óptica a partir da identificação da luz com as ondas electromagnéticas dadas pela equação de onda.

Para terminar, importa referir que a velocidade das ondas electromagnéticas não representa apenas a velocidade da luz, mas, neste novo quadro conceptual, a velocidade com que a acção eléctrica e a acção magnética se propagam. Por outras

palavras, **o facto de existirem ondas electromagnéticas, garante que a acção eléctrica e a magnética são acções que se propagam, com a mesma velocidade das ondas electromagnéticas, e não acções à distância.**

Maxwell construiu assim uma teoria do campo electromagnético. Uma teoria que previa a existência de ondas electromagnéticas, em que a luz seria apenas um caso particular por ser detectável pelo nosso sentido visual.

## 7.4 A teoria de Maxwell para além das equações

As equações de Maxwell dão-nos as relações entre uma série de grandezas físicas electromagnéticas, no geral, retiradas das teorias de acção à distância. Por si só não nos dão a interpretação física das mesmas, nem, obviamente, constituem a teoria electromagnética de Maxwell, sendo apenas a parte matemática desta.

Para compreender a teoria de Maxwell torna-se, por isso, necessário analisar os conceitos físicos associados às grandezas físicas envolvidas e o papel destas na teoria física de Maxwell.

É isso que me proponho fazer a seguir.

### 7.4.1 O que é (para Maxwell) o campo electromagnético?

Na dedução das suas equações para o campo electromagnético, Maxwell não faz uso de nenhuma hipótese sobre a natureza do campo electromagnético, excepto as implícitas nas definições de “força electromotriz” e de “força magnética” – correspondentes, respectivamente, ao campo eléctrico e ao campo magnético – onde se indica que, em cada ponto do espaço, deve haver algo que actua sobre um condutor, produzindo neste uma diferença de potencial, e algo que actua sobre o pólo de um íman produzindo sobre este uma força. Este algo seria o campo electromagnético.

O campo electromagnético fica, assim, definido pelo seu efeito, não se acrescentando nada acerca da sua natureza.

De notar que a “força electromotriz” e a “força magnética” não são forças newtonianas, uma vez que existem definidas em todo o espaço. A sua natureza não é, portanto, a das forças newtonianas.

No entanto, as referidas “forças” deveriam ser causadas por forças de contacto newtonianas<sup>97</sup> entre as partículas de um éter mecânico.

Com efeito, Maxwell escreve na introdução do artigo:

“A teoria que proponho pode, portanto, ser chamada uma teoria do campo electromagnético, porque tem a ver com o espaço na vizinhança dos corpos eléctricos e magnéticos, e pode ser chamada uma teoria dinâmica porque assume que nesse espaço existe matéria em movimento, pela qual os fenómenos observados são produzidos” [Maxwell, 1865, (3)]

Basta ver todas as analogias que Maxwell fez com mecanismos descritos pelas leis da mecânica de Newton para perceber que essa matéria seria descrita por tais leis e, portanto, seria um éter mecânico, tal como o pressuposto nas teorias ondulatórias da luz.

De facto, Maxwell sempre acreditou que os fenómenos electromagnéticos seriam o resultado da acção de um éter mecânico. A diferença é que ao deduzir as suas equações sem referência a qualquer hipótese acerca do éter, Maxwell tornou as suas equações independentes do modelo do éter que se viesse a desenvolver, deixando para a posteridade a tarefa, afinal nunca cumprida, de perceber qual a constituição desse éter.

Existe, assim, uma lacuna entre a definição, pelo efeito, dos campos eléctrico e magnético e o éter mecânico que Maxwell considera causar os efeitos correspondentes. Falta a explicação de como o éter mecânico causaria os referidos efeitos.

#### 7.4.2 Carga eléctrica, correntes e ímanes: as fontes do campo electromagnético

---

<sup>97</sup> Recorde-se que, como referido na secção 1.5, Newton considerou dois tipos de forças: as de contacto e as de acção à distância. Maxwell manteve as primeiras, bem como a mecânica de Newton, e opôs-se à existência das últimas.

A carga eléctrica e as correntes eléctricas presentes nos condutores são, juntamente com os ímanes, consideradas fontes de força eléctrica e de força magnética, quer nas teorias de acção à distância, quer na teoria electromagnética de Maxwell.

No entanto, Maxwell, em vez de falar de cargas eléctricas e correntes eléctricas no sentido newtoniano dos termos, fala, respectivamente, em “electricidade” livre e electricidade em movimento, havendo um outro tipo de electricidade que não é livre, nomeadamente, a que está na origem da polarização dos dieléctricos e das correntes de deslocamento.

Mais precisamente, Maxwell distingue dois tipos de “electricidade”: a livre, que Maxwell considera resultar “da electrificação de diferentes partes do campo não se neutralizando umas às outras” [Maxwell, 1865, (68)]; e a associada com a polarização eléctrica, ou deslocamento eléctrico, que globalmente se anula, pois resulta da electrificação oposta de lados opostos de uma molécula.

O movimento da electricidade livre, existente apenas, note-se, nos condutores, gera as correntes eléctricas, propriamente ditas, que também só existem nos condutores. Por outro lado, o movimento da electricidade associada à polarização eléctrica, medido pela variação do deslocamento eléctrico, gera as correntes de deslocamento.

A grande inovação de Maxwell consiste em considerar que as correntes de deslocamento também são fontes de campo magnético. Veremos mais à frente como esta inovação é crucial para a propagação da acção eléctrica e magnética.

Outra característica da teoria de Maxwell é que a electricidade, livre ou não, é um fenómeno de campo, existindo no éter. Pela própria definição de electricidade livre vemos isso.

Isto implica que não são os condutores e os dieléctricos que têm ou não electricidade. É o campo que, na região onde existem os condutores, tem electricidade livre e nos meios dieléctricos tem electricidade que se manifesta pela polarização eléctrica do meio.

Além disso, esta opção permite a Maxwell considerar o vácuo como um dieléctrico, pois o éter é, ele próprio, um dieléctrico. Permite também considerá-lo



como matéria sujeita a polarização magnética. Vamos ver isso mesmo, na secção seguinte.

Quanto aos ímanes (e, conseqüentemente, à carga magnética) importa notar que Maxwell não diz em lugar algum a que se deve a sua permanente magnetização ou polaridade. Na verdade Maxwell não faz qualquer hipótese quanto à natureza da magnetização, da polarização magnética e da carga magnética.

### 7.4.3 Polarização eléctrica e magnética do vácuo

A força electromotriz e a força magnética geram, quer na teoria de Maxwell, quer na teoria de Thomson de acção à distância, polarização eléctrica e magnética, linearmente dependentes, respectivamente, da força electromotriz e da força magnética que as geram.

A grande diferença entre a teoria de Maxwell e as teorias de acção à distância é que, na teoria de Maxwell, o “deslocamento eléctrico” e a “indução magnética”, que medem, respectivamente, a polarização eléctrica e magnética, são considerados em todo o espaço e não apenas nos meios materiais, isto é, na matéria ponderável.

Quer isto dizer que não só a matéria ponderável é polarizável, mas também o espaço vazio de matéria ponderável, supostamente preenchido por um éter mecânico, é polarizável. Por outras palavras, o éter, existente no vácuo, é polarizável.

Com efeito, se o éter no vácuo não fosse polarizável, a permitividade eléctrica e magnética do vácuo seriam ambas iguais a zero (de modo a que o deslocamento eléctrico e a indução magnética fossem nulos) e conseqüentemente a velocidade da luz no vácuo seria infinita, o que é o mesmo que dizer que não existiriam ondas electromagnéticas no vácuo, mas apenas acção eléctrica e magnética instantânea e à distância. Conclui-se, assim, que o éter existente no vácuo é polarizável. Resta saber como se polariza.

Existe o problema de a polarização eléctrica, medida pelo deslocamento eléctrico, só estar definida por Maxwell para o caso de corpos materiais. Com efeito, Maxwell definiu o deslocamento eléctrico, como vimos, como a electrificação oposta de lados opostos das moléculas de um corpo.

Já a polarização magnética, não está definida. Pressupõe-se apenas que é devido a esta que a indução magnética difere da força magnética, sendo a razão entre as duas a permeabilidade magnética.

Maxwell, ao não dizer o que são os dipolos magnéticos, nem o que é a polarização magnética e a polarização eléctrica do vácuo, deixa-nos, assim, sem saber que polarização do vácuo é essa que dá sustento às ondas electromagnéticas, permitindo que a acção eléctrica e a acção magnética não sejam, como supunham os newtonianos, acções instantâneas à distância.

#### 7.4.4 Corrente de deslocamento e sua relação com as ondas electromagnéticas

Embora a polarização do vácuo seja essencial para a existência das ondas electromagnéticas nesse mesmo vácuo e, portanto, para a propagação da acção eléctrica e magnética no vácuo, é a corrente de deslocamento (devida à variação no tempo da polarização eléctrica) e, especialmente, a sua introdução na lei de Ampère, a grande novidade da teoria de Maxwell, e o que garante a existência de ondas electromagnéticas em qualquer meio.

Com efeito, para haver ondas electromagnéticas, e consequentemente propagação da acção eléctrica e magnética, torna-se necessário que o campo eléctrico se converta em campo magnético e vice-versa<sup>98</sup>.

A lei de Faraday garante que sobre os condutores a variação do campo magnético se transforma em força electromotriz. Isto acontece também nos dieléctricos e no próprio vácuo, só que nestes não se geram correntes eléctricas. Ficaria assim garantida a conversão de força magnética em força eléctrica ou força electromotriz.

Mas para que houvesse conversão da força electromotriz em campo magnético, a força electromotriz teria de gerar campo magnético.

---

<sup>98</sup> Esta é uma consequência da necessidade, reconhecida por Maxwell, de às ondas electromagnéticas corresponder, no caso de estas serem geradas por um meio mecânico, a conversão de energia cinética - associada ao movimento, e, de acordo com as ideias de Maxwell, ao campo eléctrico - em energia potencial - associada a estados de tensão e, de acordo com as ideias de Maxwell, ao campo magnético.

A referida conversão já acontecia nos condutores, para as teorias de acção à distância, porque para estas, dentro deles a força electromotriz gerava corrente eléctrica que, por sua vez, gerava campo magnético. No entanto, para que a conversão se desse também nos dieléctricos, entre os quais o vácuo, era preciso que a corrente de deslocamento produzisse campo magnético. Isto foi garantido pela introdução da corrente de deslocamento na lei de Ampère.

Vemos, assim, que a equiparação da variação do deslocamento eléctrico a uma corrente eléctrica é fundamental para a teoria de Maxwell.

## 7.5 Resumo da teoria electromagnética de Maxwell

A teoria electromagnética de Maxwell parte do princípio que existe um éter mecânico responsável pelos fenómenos eléctricos e magnéticos. Este éter seria polarizável electricamente e magneticamente e a carga eléctrica seria um efeito do mesmo.

Os ímanes, as cargas e as correntes – estas últimas correspondentes ao movimento das cargas – gerariam, campo eléctrico e campo magnético.

O campo eléctrico geraria polarização eléctrica e a variação desta no tempo, denominada corrente de deslocamento, geraria campo magnético, perpendicular à dita corrente, cujas linhas de força formariam círculos em torno da corrente.

Sobre os condutores o campo eléctrico geraria também movimento das cargas eléctricas livres, que constituiria as correntes eléctricas. As correntes eléctricas gerariam campo magnético, perpendicular às correntes, cujas linhas de força formariam círculos em torno das ditas correntes.

A variação do campo magnético geraria um campo eléctrico que terá o sentido perpendicular ao deslocamento no tempo das linhas de força magnética.

O campo magnético geraria também campo eléctrico sobre um condutor em movimento, sendo o campo eléctrico gerado perpendicular às linhas de força magnética e ao vector velocidade do condutor.

A conversão de campo eléctrico em campo magnético e vice-versa originaria a existência de ondas electromagnéticas e a propagação com velocidade finita das acções eléctrica e magnética, garantido assim que não seriam acções à distância.

Dado que a velocidade das ondas electromagnéticas, calculada no vácuo e no ar, coincidia com a velocidade da luz conhecida nestes dois meios, Maxwell concluiu que a luz seria constituída por ondas electromagnéticas que se propagariam no éter com velocidade dependente da permeabilidade eléctrica e magnética dos meios materiais que atravessassem, igual a  $c$  no caso do vácuo.

Mergulhada neste éter, e movendo-se no espaço de acordo com as leis de Newton, existiria a matéria dita ponderável. Sobre esta actuariam as forças eléctricas e magnéticas de acordo com as equações para as forças eléctrica e magnética.

Esta é, muito resumidamente, a teoria electromagnética que Maxwell deixou para os que o seguiram. Vamos agora ver alguns problemas que a teoria levanta devidos à separação entre espaço, campo e matéria.

## 7.6 Problemas da teoria electromagnética de Maxwell devidos à separação entre espaço, campo e matéria

Enquanto Faraday tinha uma visão do mundo segundo a qual a força constituiria a matéria, sendo as partículas ou átomos não mais do que centros de força, e o espaço possivelmente não mais do que a extensão da força<sup>99</sup> ou campo de forças, nunca tendo feito qualquer referência a um espaço ou movimento absoluto, Maxwell, ao trabalhar com um éter mecânico, admitia a existência do espaço como entidade separada do éter, e, consequentemente, do campo. Por outro lado, ao desistir de um modelo para o éter, mas mantendo as equações, Maxwell separou o campo da matéria tendo inclusivamente um conjunto de equações para o campo (as

---

<sup>99</sup> Embora seja natural que ao identificar força com matéria e ao considerar a força como distribuída pelo espaço, Faraday considerasse o espaço como idêntico à força, isto não é obrigatório. De facto Faraday nunca disse que existiria um espaço separado da matéria, nem fez qualquer referência ao espaço absoluto newtoniano, no entanto, Faraday pode considerar o espaço como algo distinto da força sem prejudicar a sua concepção da força como algo que existe em todo o espaço e constitui a matéria e também sem identifica-lo com o espaço absoluto: Basta que considere espaço como simples sinónimo de lugar e espaço vazio como sinónimo de lugar onde não existe matéria.

quatro equações de Maxwell) e outro para a acção deste sobre cargas, correntes e ímanes (as equações da força sobre estas entidades).

Isto gerou problemas que iremos analisar de seguida.

### 7.6.1 Problemas relacionados com a separação entre matéria e campo

Como dissemos, contrariamente ao que acontecia no seu modelo inicial do éter, na teoria que Maxwell deixou para a posteridade, a matéria deixou de ser considerada parte do campo. Nomeadamente, os condutores e os diversos meios materiais seriam meios materiais distintos do éter, e não, como no seu modelo inicial, porções do éter com características diferentes.

Isto criou vários problemas, tanto mais que na ausência de um modelo do éter não existe também um modelo para a interacção entre o éter e a matéria.

Os problemas começam logo com a justaposição/sobreposição de duas substâncias consideradas distintas: éter e matéria. Para efectuar cálculos, Maxwell considerou que a matéria ponderável existe sobreposta com o éter. Isto é conceptualmente impossível para um éter mecânico, obrigatoriamente constituído por partículas materiais newtonianas. Com efeito, uma vez que as partículas materiais newtonianas ocupam espaço, as partículas materiais constituintes do éter não se podem sobrepor com as partículas materiais constituintes da matéria.

Por este motivo, a separação ontológica entre matéria e éter levou a admitir que o deslocamento (absoluto) da matéria deveria provocar um deslocamento (absoluto) das partículas do éter adjacentes às partículas da matéria em movimento, deslocamento que não é tratado na teoria de Maxwell.

Este problema já havia sido levantado no contexto da óptica onde surgiu a questão se os corpos ao moverem-se arrastariam consigo o éter ou o deixariam indiferente. Neste contexto, Fresnel defendeu que o éter não seria afectado pelo movimento dos corpos, em particular da Terra, enquanto George Gabriel Stokes defendeu que seria arrastado pelos corpos, em particular pela Terra que arrastaria consigo uma “atmosfera” de éter que próxima da Terra se moveria com a Terra mas que à medida que nos afastamos da Terra é menos arrastada até que longe da terra

estaria em repouso em relação às estrelas fixas. Mais tarde, Fresnel fez uma segunda proposta em que a matéria em movimento arrasta a luz, (não o éter, segundo nos diz Berkson em [Berkson, 1974, pág. 262]) num certo grau, isto é, parcialmente, de modo que à velocidade da luz num meio material absolutamente imóvel, seria somada, no mesmo meio em movimento uma fracção da velocidade do meio em movimento. Esta fracção é designada por “coeficiente de arrasto de Fresnel” e depende do índice de refração do meio, segundo Fresnel propôs, por existir uma condensação do éter no interior do meio proporcional ao seu índice de refração.

A primeira destas opções é mecanicamente impossível visto que implica a sobreposição entre o éter e a matéria. No entanto foi desenvolvida por Fresnel ao ponto de o levar à sua segunda proposta. Esta segunda proposta foi testada por Hippolyte Fizeau, que, em 1851, verificou que a velocidade da luz na água quando esta se movia num certo sentido era diferente da velocidade da luz na água se esta última se movesse em sentido contrário, de acordo com o previsto pelo coeficiente de arrasto de Fresnel. Além disso, como veremos, Lorentz também defendeu que o éter não seria afectado pelo movimento da matéria, tendo resolvido o problema da sobreposição simplesmente abdicando da hipótese de que o éter seria um éter mecânico. Quanto ao coeficiente de arrasto de Fresnel, Lorentz obteve-o a partir da sua própria teoria.

A segunda das opções, a opção de Stokes de que o éter seria arrastado pela matéria em movimento, foi criticada por Lorentz por não explicar o coeficiente de arrasto de Fresnel. Além disso, Lorentz argumentou que, se o éter que fosse um fluido newtoniano incompressível e fosse arrastado pelo movimento dos corpos, surgiriam remoinhos no éter próximos da Terra devidos à rotação desta em torno do seu eixo, o que faria prever efeitos na observação das estrelas a partir da Terra que não eram observados.

A teoria de Lorentz teve um tal impacto na comunidade científica que fez esquecer praticamente a possibilidade de o éter ser arrastado pelos corpos em movimento. No entanto, assim como Lorentz propôs um éter não mecânico que seria indiferente ao movimento dos corpos, poder-se-ia propor um éter não mecânico que se movesse com os corpos, como aconteceria se os corpos fossem parte desse éter, não existindo divisão ontológica entre campo e matéria.

Isto evitaria o problema seguinte que resulta da separação entre o éter e a matéria. Se a matéria no seu movimento não arrasta consigo o éter, então tem uma certa velocidade relativamente ao éter. Neste a luz se propaga-se com uma velocidade que, de acordo com a teoria de Maxwell, só depende do meio e não da velocidade da fonte. Consideremos então um emissor e um receptor na Terra que distam um do outro uma distância  $d$ . Visto que a terra não arrasta consigo o éter, movendo-se em relação a este com uma certa velocidade, a luz para ir do emissor ao receptor propagando-se no éter percorre uma distância  $d' = d + v_T t$  onde  $v_T$  é a velocidade da Terra em relação ao éter e  $t$  é o tempo que a luz demora a ir do emissor ao receptor. A velocidade da luz no éter é  $v = \frac{d'}{t}$ . Por sua vez a velocidade da luz medida em relação à terra é  $v' = \frac{d}{t}$ . Desta forma temos que a velocidade da luz medida em relação à Terra é  $v' = v - v_T$ . Vemos assim que a velocidade da luz em relação à terra dependeria linearmente da velocidade da terra em relação ao éter porque o movimento da terra no éter não afectaria o movimento do éter e consequentemente a propagação da luz no éter. O mesmo se pode dizer da propagação da acção eléctrica e magnética observada na Terra: esta dependeria linearmente da velocidade da Terra em relação ao éter. Isto implica que os fenómenos electromagnéticos observados na terra dependam da velocidade da terra em relação ao éter de uma certa forma determinada pela linearidade da relação entre a propagação eléctrica e magnética observada na terra e a velocidade da terra em relação ao éter. Tal relação entre os fenómenos eléctricos e magnéticos observados na terra e a velocidade da terra nunca foi, contudo, experimentalmente verificada, isto é, verifica-se que a suposta linearidade não existe. Em particular a velocidade da luz em relação à terra não depende linearmente da velocidade da terra em relação ao éter. A conclusão mais natural seria a de o movimento do éter, isto é, do meio em que se propaga a acção eléctrica e magnética, depender efectivamente do movimento da matéria como aconteceria se a matéria fosse parte do éter e não houvesse distinção ontológica entre os dois. Além disso se a matéria interagir com o campo de forma não linear que a não-linearidade verificada surja. No entanto, os físicos do final do séc. XIX enveredaram por soluções deste problema em que o movimento do éter não depende do movimento da matéria

e ainda hoje a linearidade da interacção entre campo e matéria está na base das teorias físicas propostas.

De notar que na prática, para efeitos de cálculo em experiências pouco precisas, a terra pode ser considerada em repouso em relação ao éter pois a velocidade da terra em relação ao éter é muito menor que a velocidade da luz no éter.

Outra questão que a separação entre campo e matéria levanta é a da relação das cargas e correntes com o condutor onde se consideram contidas. Com efeito, dado que o campo electromagnético é causa da atracção e repulsão de condutores, estes últimos devem conter cargas e correntes que se deslocam juntamente com o condutor, o que implica uma estreita relação entre condutores e cargas, a ser explicada pela relação entre o éter e a matéria. Tal relação só poderia ser determinada por um modelo do éter e da matéria que expusesse a relação entre as duas entidades. Maxwell reconhece a necessidade desse modelo mas considerou que não existiam ainda dados experimentais que permitissem chegar ao modelo correcto.

Também as permeabilidades eléctrica e magnética dos meios impunham uma relação entre o éter e a matéria que ficou por explicar. O mesmo acontece com a existência de meios condutores e meios isolantes.

### **7.6.2 Problemas relacionados com a existência de um espaço absoluto**

Para além dos problemas acima indicados, referentes principalmente à relação entre éter e matéria, a teoria de Maxwell levantava outro tipo de problemas. Falamos dos que se relacionavam com o movimento do éter e da matéria em relação ao espaço. Estes resultavam de se considerar a existência não só do éter e da matéria mas também outra entidade que emergia do compromisso maxwelliano entre electromagnetismo e a metafísica newtoniana subjacente ao conceito de éter mecânico, cuja existência Maxwell postulou: o espaço absoluto newtoniano.

Com efeito, ao admitir como verdadeira a mecânica de Newton, Maxwell admite a existência do espaço absoluto newtoniano postulado logo na primeira lei. Isto faz com que se tenha de ter em conta, à partida, a possibilidade de movimento do éter



em relação ao espaço absoluto, criando o problema da interpretação da velocidade do condutor presente nas equações de Maxwell.

Quanto ao movimento do éter importa notar que um éter mecânico se deveria deslocar quando a matéria ponderável se desloca, de modo a que esta última não se sobrepusesse com o éter.

Por outro lado, às forças eléctricas e magnéticas que actuam sobre os condutores, deveriam corresponder, de acordo com a terceira lei de Newton, forças que actuam sobre o éter causando a sua aceleração em relação ao espaço absoluto. Maxwell, contudo, nunca considerou o movimento absoluto do éter, pelo menos, para efeito de cálculo. Depois dele, como veremos, Lorentz limitou-se a postular que o éter estaria em repouso, não considerando assim as consequências da aplicação da mecânica newtoniana ao movimento do éter.

Quanto à velocidade do condutor, esta é considerada, nas aplicações mais comuns, como a velocidade do condutor em relação às fontes de campo magnético. No entanto, pode também ser interpretada como uma velocidade em relação ao éter, como acontecerá mais tarde na teoria electromagnética de Lorentz, em que é idêntica à velocidade absoluta, uma vez que o éter está em repouso em relação ao espaço absoluto.

De notar, que nenhuma destas questões se colocaria se a matéria fosse considerada parte do campo e o espaço a extensão do campo tal como acontece na teoria de Faraday. Nesse caso, não existiriam movimentos absolutos, mas apenas movimentos relativos de diferentes porções do campo.

## 7.7 Recepção da teoria de Maxwell

A teoria electromagnética de Maxwell foi aceite no seu país mas não no continente onde as conjecturas de Ampère, Neumann e Weber prevaleceram. Estas últimas foram, contudo, abaladas por um vasto conjunto de experiências realizadas por Heinrich Hertz de 1887, e relatadas num artigo de Fevereiro de 1888, que apoiavam veementemente a existência das ondas electromagnéticas.

Antes e depois disso a teoria electromagnética de Maxwell foi desenvolvida tendo por base as suas próprias equações e a sua ideia de um éter mecânico.

Foram feitas diferentes tentativas para interpretar os conceitos de carga e corrente eléctrica, procurando explicar, nomeadamente, a natureza das cargas e das correntes, a sua relação com a matéria ponderável. Foram também feitas tentativas para unificar o éter e a matéria, ou seja, para explicar a matéria ponderável como uma porção do éter com alguma propriedade que a distinguisse do restante éter e para explicar as interacções físicas e químicas, incluindo a gravítica, como resultado de estados e movimentos do éter.

Foram assim produzidas várias teorias sobre a carga e corrente eléctrica e também modelos mecânicos do éter.

Destas a mais importante foi a de Lorentz.

## **7.8 A teoria electromagnética não relativista de Lorentz**

### **7.8.1 Éter, espaço e matéria na teoria electromagnética de Lorentz**

Lorentz começa a sua teoria por supor a existência de um meio polarizável eléctrica e magneticamente, onde as ondas de luz se propagariam com velocidade constante igual a  $c$ , a velocidade da luz no vácuo. Este meio, designado éter, seria homogéneo e estaria em repouso absoluto.

Lorentz admitiu também que o estado de polarização do éter em cada ponto seria responsável pelo campo eléctrico e magnético (e, consequentemente pelas forças electromagnéticas) e que estes campos seriam descritos pelas equações de Maxwell com algumas modificações, como veremos.

Em relação à matéria, Lorentz considerou que esta seria uma entidade distinta do éter, analiticamente decomponível em pontos materiais, e que existiria sobreposta com o éter, em movimento ou repouso absoluto, de acordo com a primeira e a segunda lei da mecânica de Newton. Quer o éter, quer a matéria, existiriam no espaço absoluto postulado pela lei da inércia (primeira lei de Newton) e em relação ao qual o éter estaria, como se disse, em repouso. Vemos, portanto, que na teoria de Lorentz há,

tal como na de Maxwell, três entidades distintas: a matéria, o campo ou éter e o espaço absoluto.

A principal diferença entre Lorentz e os que o precederam é que para Lorentz o éter não era mecânico, ou seja, não sendo as suas propriedades descritas pelas leis de Newton e não constituindo, por essa razão, matéria. Desta forma, Lorentz pode postular que o éter estaria em repouso absoluto e a matéria se sobreporia a este, ocupando a matéria, onde esta existe, a mesma região do espaço que o éter, o qual por existir em todo o espaço existe também no espaço “ocupado” pela matéria.

### 7.8.2 Cargas, correntes, condutores e dieléctricos

Para além de considerar um éter não-mecânico, a teoria de Lorentz difere da de Maxwell quanto à natureza da carga eléctrica.

Lorentz tinha de optar entre duas posições quanto à carga eléctrica: a de que as cargas e correntes seriam um efeito de campo, como Maxwell defendeu, e a de que fariam parte da matéria, como Ampère e Weber, entre outros, defendiam. Lorentz optou pela segunda hipótese, considerando que em toda a matéria haveria partículas com carga eléctrica positiva e negativa. Os corpos carregados seriam, então, corpos que possuiriam um excesso de partículas carregadas com a carga atribuída ao corpo. Além disso, Lorentz adoptou a hipótese já anteriormente assumida, quer pela escola de Ampère e Weber, quer por alguns discípulos de Maxwell, de que as correntes eléctricas seriam o resultado do movimento de partículas electricamente carregadas. Finalmente, Lorentz considerou que os condutores seriam meios materiais em que as partículas carregadas se podiam mover livremente, e os dieléctricos meios em que as partículas carregadas se afastariam pouco das suas posições de equilíbrio, podendo apenas vibrar em torno destas.

O deslocamento das partículas eléctricas da sua posição de equilíbrio seria a causa da polarização eléctrica e a maior ou menor facilidade de polarização do dieléctrico seria responsável pela permeabilidade eléctrica do mesmo. De notar que esta definição de polarização eléctrica só serve para meios materiais deixando sem resposta o que é a polarização do éter. Lorentz também não nos diz o que é a

polarização magnética. Partindo destas hipóteses e das já referidas em relação ao espaço, ao éter e à matéria em geral, Lorentz construiu então a sua teoria electromagnética.

### 7.8.3 As equações de Lorentz para o campo eléctrico e magnético

Na teoria de Lorentz as partículas carregadas ou cargas eléctricas têm uma certa extensão e a carga está distribuída sobre estas, de forma que são portadoras da densidade de carga volúmica (isto é, carga por unidade de volume)  $\rho$ .

De acordo com a lei de Gauss para o campo eléctrico, a qual é a primeira equação de Maxwell para o campo eléctrico, a carga gera então um campo eléctrico que obedece à equação:<sup>100</sup>

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

ou seja, cujas linhas de força se iniciam e terminam nas partículas carregadas e em que a quantidade de linhas de força que sai do volume delimitado por uma superfície fechada, menos a quantidade de linhas de força que entra no mesmo volume, é proporcional à quantidade de carga no seu interior.

Por outro lado, se uma carga eléctrica estiver em movimento, constitui, segundo Lorentz, uma corrente eléctrica com direcção e sentido do movimento da carga e cujo módulo da densidade de corrente é igual ao produto da densidade de carga pelo módulo da velocidade absoluta da partícula, ou seja,

$$\vec{j} = \rho \vec{v}$$

Esta corrente eléctrica gerará campo magnético de acordo com o previsto pela lei de Ampère-Maxwell.

Além disso, pode ocorrer variação do deslocamento eléctrico com o tempo, o que também dará origem a campo magnético, de acordo com o previsto também na lei de Ampère-Maxwell. A lei de Ampère-Maxwell toma então a forma:

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi(\rho \vec{v} + \frac{d\vec{D}}{dt})$$

---

<sup>100</sup> Nesta e nas equações seguintes coloquei os operadores divergência, rotacional e o sinal de produto vectorial na notação moderna. Modifiquei também as letras que representam os diferentes vectores e correspondentes grandezas físicas de modo a ficarem coincidentes com as letras que usei anteriormente para representar as grandezas envolvidas nas equações de Maxwell.

onde  $\vec{v}$  é a velocidade da partícula e  $\rho$  a sua densidade de carga. O significado desta equação é o mesmo da equação de Ampère-Maxwell discutida anteriormente, apenas com a diferença introduzida por Lorentz de que a corrente eléctrica é dada pela definição anterior.

A esta equação junta-se, na determinação do campo magnético gerado pela partícula, a lei de Gauss para o campo magnético, também conhecida como primeira equação de Maxwell para o campo magnético:

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

Mais uma vez esta equação significa que as linhas de força magnética são sempre fechadas, não existindo pólos magnéticos isolados.

Finalmente, Lorentz considera que, tal como previsto pela lei de Faraday enunciada por Maxwell, a variação do campo magnético com o tempo dá origem a campo eléctrico e a deslocamento eléctrico segundo a equação:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\mu_0 \frac{d\vec{H}}{dt} \Leftrightarrow \nabla \times \vec{D} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{H}}{dt} \\ \Leftrightarrow \nabla \times \vec{D} &= -\frac{1}{4\pi c^2} \frac{d\vec{H}}{dt} \end{aligned}$$

onde  $\vec{E} = \vec{D}/\epsilon_0$  por o meio em que a carga se insere ser o éter e  $c = \frac{1}{\sqrt{4\pi\mu_0\epsilon_0}}$  é a velocidade de propagação da luz no éter.

As quatro equações anteriores são as equações de Lorentz para o éter<sup>101</sup>. Sabendo os valores iniciais para o campo eléctrico e magnético e o movimento da carga em todos os instantes de tempo futuros, e admitindo que, à medida que nos afastamos da carga, o campo eléctrico e magnético tendem para zero, os campos eléctrico e magnético ficam totalmente determinados para qualquer instante de tempo futuro, pelas equações referidas.

Para terminar importa notar que, uma vez que as equações são lineares, para saber o campo eléctrico e magnético gerado por um sistema de cargas, basta somar o campo eléctrico e magnético gerado por cada uma das cargas individualmente.

---

<sup>101</sup> Vale a pena notar que diferem ligeiramente das de Maxwell na medida em que não entra para o valor do campo eléctrico a componente que resulta do movimento do condutor que, neste caso, poderia resultar do movimento da partícula. Como veremos essa componente aparecerá ligada à força de Lorentz e não ao campo eléctrico.

### 7.8.4 A força de Lorentz

Acabámos de ver como, na teoria electromagnética de Lorentz, as cargas eléctricas afectam o éter nomeadamente produzindo campo eléctrico e magnético que se pode determinar aplicando as equações anteriores. Vamos agora ver como o éter afecta as partículas eléctricas.

Segundo Lorentz o éter afecta as partículas eléctricas exercendo, sobre cada uma, uma força por unidade de carga, que designaremos aqui de força electromagnética ou força de Lorentz, a qual depende, em cada instante de tempo, do campo eléctrico e magnético nos pontos do espaço e do éter em que a carga se encontra, e da velocidade absoluta da mesma. Esta força é responsável por uma aceleração da partícula conforme a segunda lei de Newton.

Para determinar a força que o éter exerce sobre uma carga eléctrica Lorentz recorreu, em primeiro lugar, à teoria electrostática de Poisson, cujas conclusões considera que estão de acordo com a experiência. Dessa teoria, e da definição de deslocamento eléctrico, retirou a conclusão de que sobre uma partícula carregada, localizada numa região onde exista o campo eléctrico  $\vec{D}$ , actua uma força por unidade de carga dada por:

$$\vec{F}_{el} = \vec{E} = 4\pi c^2 \vec{D}$$

onde  $\vec{F}_{el}$  é a parte da força electromagnética que actua sobre uma carga eléctrica unitária devida ao campo eléctrico nesse ponto, sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo. Se a referida força actuar sobre uma carga  $q$ , temos:

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E}$$

Esta equação significa que a força eléctrica que actua sobre uma carga eléctrica é proporcional à carga e ao campo eléctrico tendo a direcção e o sentido do campo eléctrico.

Para determinar a parte da força electromagnética devida ao campo magnético na região onde a partícula se encontra, Lorentz considera a fórmula de Maxwell para a força magnética que actua sobre a corrente eléctrica, a qual para um fio condutor se pode escrever:

$$\vec{f}_m = I \vec{ds} \times \vec{H}$$

onde  $\vec{f}_m$  é a força infinitesimal, devida ao campo magnético, exercida numa porção, de comprimento infinitesimal, de um fio condutor;  $I$  é a intensidade de corrente, dada pela quantidade de carga que atravessa a secção do fio por unidade de tempo e  $\vec{ds}$  é um vector infinitesimal tangente ao fio. Esta equação significa que a força magnética é perpendicular ao fio e às linhas de força magnética e tem intensidade proporcional à intensidade de corrente eléctrica e à intensidade do campo magnético.

A intensidade de corrente é, por definição, a média da densidade de corrente multiplicada pela área da secção do fio condutor, o que permite escrever:

$$I = A\bar{j}$$

onde  $A$  é a área da secção do fio e  $j$  é a densidade de corrente.

Dado que as correntes eléctricas resultam do movimento das partículas eléctricas, contribuindo cada partícula em movimento para a densidade de corrente através do produto da sua densidade de carga pela sua velocidade, a média da densidade de corrente é a média, sobre todos os pontos do volume em que se localiza a porção infinitesimal do fio ( $Ads$ ), do produto da densidade de carga pela velocidade da carga em cada ponto, ou seja,

$$\bar{j} = \frac{1}{Ads} \int \rho v dV$$

Tendo em conta falamos de partículas carregadas, esta média é dada pela soma, sobre todas as cargas, do produto da carga pela sua velocidade, a dividir pelo volume da porção infinitesimal do fio, o qual é dado pelo produto da área da secção do fio pelo comprimento da porção infinitesimal, ou seja

$$\bar{j} = \frac{1}{Ads} \sum qv$$

onde  $q$  é a carga de cada partícula.

Multiplicando a média referida pela área da secção do fio ( $A$ ), verificamos que a intensidade da corrente é dada pela soma, sobre todas as cargas, do produto da carga pela sua velocidade, a dividir pelo comprimento da porção infinitesimal do fio, ou seja,

$$I = \frac{1}{ds} \sum qv$$

Substituindo na expressão que dá a força magnética sobre uma corrente eléctrica, vem:

$$\vec{f}_m = \frac{1}{ds} \sum (qv) \vec{ds} \times \vec{H} = \sum q (\vec{v} \times \vec{H})$$

ou seja, a força magnética sobre uma corrente eléctrica é igual à soma, sobre todas as partículas que compõem a corrente, do produto vectorial da velocidade da partícula pelo campo magnético, o que dá uma força que é a soma, sobre todas as partículas, da força que actua sobre cada carga com direcção perpendicular, quer à velocidade da carga, quer ao campo magnético, na região ocupada pela carga, e cuja intensidade é proporcional, quer à velocidade, quer ao campo magnético.

Para Lorentz é então razoável considerar que sobre cada partícula eléctrica actua, devido ao campo magnético, uma força por unidade de carga segundo a equação

$$\vec{F}_m = \vec{v} \times \vec{H}$$

ou seja, sobre cada carga eléctrica actua uma força magnética por unidade de carga eléctrica que é simultaneamente perpendicular à velocidade da carga e ao campo magnético na região ocupada pela carga, e cuja intensidade é proporcional quer à referida velocidade, quer ao referido campo magnético.

A força electromagnética que o éter exerce sobre uma partícula carregada, por unidade de carga da mesma, é então a soma da força eléctrica e da força magnética e é dada por:

$$\vec{F} = 4\pi c^2 \vec{D} + \vec{v} \times \vec{H}$$

Com esta equação e as outras quatro mencionadas na secção anterior, podemos saber, conhecidas as forças que actuam sobre os corpos para além da electromagnética, a posição e a velocidade inicial das cargas existentes nos mesmos corpos, bem como os campos eléctrico e magnético iniciais; sabendo tudo isto para um instante de tempo, podemos saber a posição das cargas e dos corpos e o campo electromagnético em cada instante de tempo futuro.

É isto o que prometem as equações de Lorentz.

### 7.8.5 As equações de Lorentz para um sistema de referência num laboratório na terra



Dado que as equações de Lorentz envolvem velocidades absolutas e derivadas em ordem ao tempo de campos que existem sobre um éter absolutamente imóvel, torna-se necessário, para a utilização rigorosa das equações de Lorentz, determinar as condições iniciais, nomeadamente, a velocidade inicial dos corpos e das cargas e os campos eléctrico e magnético iniciais, em relação a um referencial em repouso absoluto, o qual é também o referencial em relação ao qual as equações permitem determinar os campos, as posições e as velocidades posteriores das cargas.

Isto significa que, para aplicar rigorosamente as equações de Lorentz, não basta conhecer o campo e as velocidades das partículas num sistema de referência que se estabeleça num laboratório na Terra, pois a Terra não está em repouso absoluto. Significa também que, se quisermos utilizar as equações de Lorentz para saber rigorosamente os campos eléctrico e magnético e as velocidades e posições posteriores das cargas num sistema de referência ligado à Terra, temos de saber a velocidade absoluta da Terra e adaptar as equações, escrevendo-as em função da velocidade do novo referencial – a velocidade absoluta da terra – e da velocidade das cargas relativa ao novo referencial.

Lorentz fez esta adaptação e obteve as seguintes equações:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E}' = -\frac{d\vec{H}}{dt}$$

$$\nabla \times \vec{H}' = 4\pi(\rho\vec{v} + \frac{d\vec{D}}{dt})$$

$$\vec{F} = \vec{E}' + \vec{v} \times \vec{H}'$$

$$\vec{E}' = 4\pi c^2 \vec{D} + \vec{V} \times \vec{H}$$

$$\vec{H}' = \vec{H} - 4\pi \vec{V} \times \vec{H}$$

onde  $\vec{E}'$  e  $\vec{H}'$  são respectivamente o campo eléctrico e magnético medidos no laboratório,  $\vec{V}$  a velocidade da terra e  $\vec{v}$  velocidade das cargas no referencial do laboratório.

### 7.8.6 O princípio da relatividade e as tentativas de confirmação da existência de um referencial privilegiado no qual a velocidade da luz fosse $c$ .

O facto de as equações de Lorentz aplicadas num referencial absolutamente imóvel serem diferentes das equações aplicadas num referencial móvel com velocidade considerada constante, constitui uma violação do princípio da relatividade segundo o qual as equações devem ser as mesmas quando aplicadas em sistemas de referência inerciais, isto é, cuja velocidade absoluta se pode considerar constante, não havendo distinção entre tais sistemas.

Esta violação implicava nomeadamente que os fenómenos observados por um observador em repouso absoluto deveria ser diferentes dos observados por um observador que se movesse com velocidade constante.

Em particular, os fenómenos electromagnéticos observados na terra deveriam ser diferentes dos fenómenos previstos pelas equações de Lorentz aplicadas num referencial imóvel em relação ao éter. Por outras palavras, os fenómenos electromagnéticos deveriam ser sensíveis à velocidade absoluta da terra.

A esta conclusão tinham chegado os físicos no caso particular da óptica, antes mesmo de Lorentz ter desenvolvido a sua teoria. É que se existe, como Fresnel propôs, um éter em repouso absoluto no qual a luz se propaga com velocidade constante, então a velocidade da luz medida na terra deveria ser dada, em função da velocidade da luz num referencial absolutamente imóvel, de acordo com as transformações de Galileu para as posições e velocidades relativas num referencial móvel com velocidade absoluta considerada constante, pela equação:

$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}$$

onde  $\vec{c}'$  é a velocidade da luz medida num sistema de referência ligado à terra,  $\vec{c}$  a velocidade da luz num sistema de referência absolutamente imóvel e  $\vec{v}$  a velocidade absoluta da terra.

Esta diferença de velocidades, a existir, teria como consequência que a velocidade da luz apresentaria uma anisotropia, mais precisamente, uma variação com o ângulo entre a velocidade da luz e a velocidade absoluta da terra, a partir da qual se poderia, em princípio, derivar a velocidade absoluta da terra.

Em 1887, oito anos antes da publicação da teoria electromagnética de Lorentz, Albert Michelson e Edward Morley completaram a sua famosa experiência destinada a verificar a existência da referida anisotropia. Contudo, tal anisotropia não foi encontrada, pelo menos na dimensão prevista pelas equações de Galileu. Para além desta experiência, outras experiências foram realizadas com o objectivo de verificar aspectos nos fenómenos electromagnéticos à superfície da Terra que deveriam ser dependentes da velocidade desta. Tal dependência não foi, contudo, verificada por nenhuma experiência anterior à teoria da relatividade restrita. Só depois da publicação da relatividade restrita se realizaram experiências que verificaram uma possível anisotropia na velocidade de ida e volta da luz, mas não houve consenso quanto ao significado dessas experiências.

## Conclusão

O electromagnetismo começa com a experiência de Oersted mostrando que uma corrente eléctrica afecta um íman e que, portanto, é fonte de força magnética.

Até então, a electricidade e o magnetismo eram considerados ramos da física independentes e eram estudados com base na metafísica de Newton, a qual pressupunha que existia um espaço e um tempo absolutos nos quais se localizavam pontos materiais que interactuariam por meio de forças centrais de acção instantânea à distância, as quais teriam a direcção da linha que une os dois pontos materiais interactuantes, provocando a sua atracção ou repulsão segundo esta linha, e teriam intensidade dependente unicamente das propriedades dos pontos materiais e da posição relativa dos mesmos, diminuindo a intensidade com o quadrado da distância entre os corpos.

Os fenómenos eléctricos eram então considerados como resultado da interacção, por meio das referidas forças, de pontos materiais com carga eléctrica e os fenómenos magnéticos como resultado da interacção de pontos materiais com carga magnética.

A experiência de Oersted foi, assim, a primeira a não encaixar neste paradigma newtoniano.

No entanto, Ampère, um newtoniano, produziu uma teoria que tentava explicar o fenómeno, mantendo-se o mais possível dentro do referido paradigma. Ampère mostrou que as correntes eléctricas se atraíam e repeliam e propôs que cada elemento de corrente atraía ou repelia outro com uma força que tinha direcção da linha que une os dois elementos de corrente e cuja intensidade decaía com o quadrado da distância entre os elementos de corrente, tal como previa a metafísica newtoniana. O único desvio face à metafísica newtoniana consistia em que a dita força dependia também do ângulo entre os elementos de corrente, e não apenas da sua posição relativa.

Esta teoria era consistente com a experiência de Oersted e o magnetismo pressupondo que os ímanes teriam na sua composição correntes eléctricas circulares em torno do seu eixo. Quanto à electricidade estática mantinha-se a teoria anterior.

Desta forma, Ampère explicou os fenómenos electromagnéticos com base em interacções entre pontos materiais com carga e entre elementos de corrente.

Depois de Oersted e Ampère, foi Faraday quem desenvolveu o electromagnetismo. A principal descoberta de Faraday foi a indução electromagnética. Faraday também descobriu a rotação de um íman em torno de uma corrente eléctrica e vice-versa, a capacidade indutiva específica dos dieléctricos e a rotação do plano de polarização da luz quando esta atravessa materiais diamagnéticos sujeitos à acção da força magnética. Descobriu ainda os fenómenos diamagnéticos e paramagnéticos.

Contrariamente a Ampère, Faraday desenvolveu o seu trabalho à margem da metafísica newtoniana e interpretou as suas descobertas num quadro metafísico próprio. Para Faraday tudo o que existia eram as linhas de força, sendo a matéria centros dessas linhas de força, isto é, pontos de onde emergem, ou para onde convergem as linhas de força. A força propagar-se-ia não existindo acção à distância mas apenas acção por contiguidade, o que tornava a sua teoria a primeira teoria de campo. A carga eléctrica seria resultado de uma distribuição polar da força eléctrica que deixaria as partículas num estado polarizado. A transmissão do estado polarizado de umas partículas para as outras daria origem às correntes eléctricas.

As conjecturas de Faraday eram meramente esquemáticas e Faraday nunca conseguiu encontrar evidência empírica de que a acção electromagnética fosse uma acção por contacto e não uma acção instantânea à distância. Isso, juntamente com a predominância da metafísica de Newton, fez com que as ideias de Faraday fossem ignoradas sendo apenas reconhecidas as suas descobertas experimentais.

No continente, mais precisamente na Alemanha, Weber tentou desenvolver uma teoria electromagnética que explicasse os fenómenos electromagnéticos a partir de uma metafísica semelhante à newtoniana, assumindo a interacção à distância de pontos materiais com carga. A única diferença relativamente à metafísica newtoniana era a de que intensidade das forças dependia não só da posição relativa das cargas mas também da sua velocidade e aceleração relativas.

Já em Inglaterra, mais precisamente, em Cambridge, foi Maxwell quem desenvolveu a teoria electromagnética, partindo de uma metafísica ligeiramente diferente da newtoniana, contaminando-a com a metafísica de Faraday. Admitia assim que, para além da matéria ponderável, constituída, tal como na metafísica de Newton,

por pontos materiais que se localizam num espaço e tempo absolutos, existiria um fluido imponderável que preencheria todo o espaço absoluto não ocupado por matéria ponderável e que seria pelo menos analiticamente decomponível em pontos materiais, os quais obedeceriam às leis da mecânica de Newton, que, por essa razão, interactuariam apenas por forças de contacto e não por forças de acção à distância. Este é o éter mecânico proposto inicialmente no contexto da óptica ondulatória e que Maxwell considera ser a causa das forças eléctrica e magnética.

Para estudar essa possibilidade, Maxwell produziu um modelo do éter com o qual deduziu as suas equações para o campo electromagnético. Verificou depois que nesse éter se propagariam ondas electromagnéticas transversais com a velocidade da luz. Concluiu então que as ondas electromagnéticas seriam da mesma natureza das ondas luminosas.

Mais tarde, Maxwell abandonou o seu modelo de um éter mecânico e deduziu as equações a partir de factos já conhecidos. Mostrou depois que as equações implicavam a existência de ondas electromagnéticas transversais que se propagariam com uma velocidade igual à da luz. Nesta dedução, Maxwell definiu o campo eléctrico e o campo magnético pelos seus efeitos. No entanto, não conseguiu deduzir esses efeitos a partir da existência de um éter mecânico, tal como ele o concebera.

Por outro lado, a teoria de Maxwell implicava que o éter fosse polarizável electricamente e magneticamente. Mas não explica o que seria essa polarização.

A teoria de Maxwell tem ainda uma série de problemas derivados da separação entre campo, matéria e espaço. Em particular, o problema da sobreposição entre a matéria e o éter. Para efeitos de cálculo é como se a matéria se sobrepusesse com o éter, mas tal não é possível, pois, sendo o éter mecânico, este ocupa espaço, o que significa que nada pode estar no lugar que este ocupa. Isto faz com que o éter se devesse mover quando a matéria se move, um movimento que não é levado em conta.

Existe também o problema de saber que velocidades entram nas equações de Maxwell. Para a maioria das aplicações práticas chega considerar a velocidade relativa entre as fontes de campo magnético e os materiais sob acção destas forças. No entanto, em rigor, levanta-se a questão de as fontes e os materiais estarem em movimento em conjunto com a Terra e de saber como é que esse movimento afecta os fenómenos electromagnéticos.

De notar que nenhuma destas duas questões se levantava na teoria electromagnética de Faraday onde a matéria seriam meros pontos de convergência das linhas de força, e o espaço seria a extensão da força e, portanto, a matéria e o espaço não seriam entidades separadas do campo de forças.

Lorentz tentou construir a última teoria electromagnética clássica. Considerou que existiria por todo o espaço um éter polarizável, quer eléctrica, quer magneticamente. Ao contrário do éter de Maxwell, este não obedeceria às leis da mecânica de Newton. Lorentz não esclarece o que seria este éter nem como se polarizaria, limitando-se a supor que existiria e que estaria em repouso absoluto. Sobreposta com o éter, isto é, ocupando espaço onde existe éter, existiria a matéria composta, como na teoria de Newton, por pontos materiais obedientes à primeira e segunda lei de Newton.

Nesta teoria, os fenómenos electromagnéticos seriam devidos à interacção entre pontos materiais com carga eléctrica, as cargas eléctricas, e o éter. As cargas gerariam polarização eléctrica e magnética, de acordo com as equações de Maxwell, admitindo que a corrente eléctrica seria constituída por cargas em movimento, e o éter polarizado electricamente e magneticamente exerceria sobre as cargas uma força por unidade de carga, dependente do estado de polarização no ponto onde a carga se encontrasse e da sua velocidade.

Para além de não dizer o que seria o éter, Lorentz tem como principal problema a previsão de que os fenómenos electromagnéticos seriam sensíveis à velocidade da Terra de uma forma que a experiência não confirmou.

Podemos ver que desde o início os fenómenos electromagnéticos nunca encaixaram na metafísica newtoniana. No entanto, à excepção de Faraday, todos tentaram fazer prevalecer parte da metafísica newtoniana.

## Bibliografia

Berkson, William (1974). *Fields of force: The development of a world view from Faraday to Einstein*, London: Routledge and Kegan Paul

Darrigol, Oliver (2000). *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, New York: Oxford university press

Faraday, Michael (1821). "Historical Sketch of electro-magnetism", *The annals of philosophy*, Vol. ii, pp.195-200

Faraday, Michael (1849). *Experimental Researches in Electricity*, Volume 1, London: Richard and John Edward Taylor

Faraday, Michael (1844). *Experimental Researches in Electricity*, Volume 2, London: Richard and John Edward Taylor

Faraday, Michael (1855). *Experimental Researches in Electricity*, Volume 3, London: Bernard Quaritch

Jammer, Max (1954). *Concepts of space: The history of theories of space in physics*, Massachusetts: Harvard University Press

Jones, Bence (1870). *Life and letters of Faraday*, volume 1, Philadelphia: J. B. Lippincott and co.

Jones, Bence (1870). *Life and letters of Faraday*, volume 2, London: Longmans, Green, and co.

Lorentz, Hendrik A. (1895). *Attempt of a Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies*, Leidein: E. J. Brill



Maxwell, James Clerk (1856). "On Faraday's lines of force", in *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, volume 1, pp.155-229, New York: Dover Publications

Maxwell, James Clerk (1861-2). "On physical lines of force", in *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, volume 1, pp. 451-513, New York: Dover Publications

Maxwell, James Clerk (1865). "A dynamical theory of the electromagnetic field", in *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, volume 1, pp. 526-597, New York: Dover Publications

Nersessian, Nancy J. (1984) *Faraday to Einstein: Constructing meaning in scientific theories*, Boston: Martinus Nijhoff publishers

Newton, Isaac (1999). *THE PRINCIPIA: Mathematical principles of natural philosophy*, A New Translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, Los Angeles: University of California

Thomson, William (1845). "On elementary laws of statical electricity", in *Reprint of papers on electrostatics and magnetism*, pp.15-37, London: Macmillan & co.

Villate, Jaime E. (1999). *Electromagnetismo*, Lisboa: McGraw-Hill

Weber, Wilhelm (1846) *Determinations of electrodynamic measure: Concerning a Universal Law of Electrical Action*, in  
[http://www.21stcenturysciencetech.com/translations/Weber\\_1846.pdf](http://www.21stcenturysciencetech.com/translations/Weber_1846.pdf)

Whittaker, Edmund (1960). *A History of the theories of aether and electricity*, New York: Harper & brothers